

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Diplomová práce

Konstrukce a realizace 3D tiskárny

Design and Realization of 3D Printer

Student:

Bc. Michael Tuček

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michael Tuček**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin

Téma: Konstrukce a realizace 3D tiskárny
Design and Realization of 3D Printer

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete konstrukční provedení 3D tiskárny s rozměry tištěné oblasti 200 x 200 x 200 mm v rozsahu:

- mechanická část tiskárny,
- návrh rámu,
- návrh pojezdů,
- elektronická část tiskárny,
- řídicí systém.

Tiskárna bude sloužit pro tisk plastových dílů z PLA nebo ABS.

Zhotovte elektronickou 3D dokumentaci a výkres sestavy.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] REDWOOD, B., F. SCHÖFFER a B. GARRET. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-9082748505.
- [2] SHIGLEY, J. E., C. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS, VLK, M., ed. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [4] ALAFAGHANI, A., A. QATTAWI a M. A. ABLAT. Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. Open Journal of Applied Sciences [online]. 2017, 07(06), 291-318 [cit. 2019-11-12]. ISSN 2165-3917. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ojapps.2017.76024>
- [5] What is 3D printing? The definitive guide. 3D Hubs [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [6] PLA vs. ABS: What's the difference? 3D Hubs [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/>
- [7] HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison. 3D Hubs [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [8] Key design considerations for 3D Printing. 3D Hubs [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing>

- [9] The Advantages of 3D Printing. 3D Hubs [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>
- [10] Types of 3D Printing Technology. All3DP [online]. München: All3DP, 2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

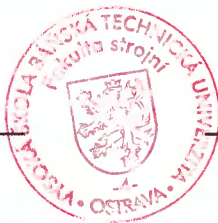
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.
vedoucí katedry

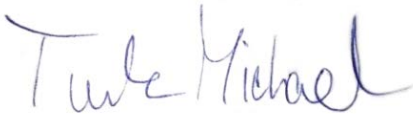


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



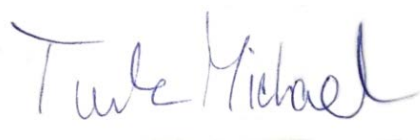
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TUČEK, M. *Konstrukce a realizace 3D tiskárny: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2020, 76 s. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá konstrukcí desktopové 3D tiskárny metodou materiálové extruze. V úvodní teoretické části jsou popsány nejpoužívanější metody 3D tisku s vyčtením výhod a nevýhod. Následně jsou přiblíženy i příslušné materiály pro tisk převážně FDM metodou. V konstrukční části je zvolen pohybový mechanismus typu CoreXY a je postupně sestaven hlavní nosný rám, portál s tiskovou hlavou, zdvihací mechanismus a návrh vyhřívané tiskové podložky. Nakonec jsou zvoleny komponenty pro elektronickou část tiskárny jako výběr tiskové hlavy, extruderu a řídicího systému. V závěru jsou zhodnoceny dosažené cíle.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

TUČEK, M. *Design and Realization of 3D Printer: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine parts and Mechanisms, 2020, 76 p. Thesis head: doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D.

Master thesis is dealing with the design of a desktop 3D printer based on a fused deposition modelling technology. The introduction section contains the description of the most used 3D printing methods with a review of benefits and disadvantages. Further are described relevant materials for printing, mainly for FDM method. In the design part, at first there is described a chosen movement mechanism CoreXY and then is designed the main support frame, gantry with the printhead, lifting mechanism and heated bed. The design above is followed by selecting the printhead, extruder and control system. The conclusion contains evaluation of achieved goals.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, tiskárna, materiálová extruze, FDM, konstrukce, návrh, CoreXY, portál

KEYWORDS

3D print, printer, material extrusion, FDM, construction, design, CoreXY, gantry

OBSAH

1	ÚVOD	13
1.1	Aditivní výroba	13
1.2	Výhody a nevýhody 3D tisku	14
2	METODY 3D TISKU.....	17
2.1	FDM – Fused Deposition Modelling	17
2.1.1	Výhody a nevýhody	19
2.1.2	Časté problémy FDM tiskáren.....	20
2.1.3	Používané tiskárny.....	23
2.2	SLA – STEREOLITOGRAPHY	25
2.2.1	Výhody a nevýhody	28
2.2.2	Používané tiskárny.....	28
2.3	SLS – Selective laser sintering	30
2.3.1	Výhody a nevýhody	32
2.3.2	Používané tiskárny.....	32
2.4	MJ – Material Jetting	33
2.4.1	Výhody a nevýhody	34
2.4.2	Používané tiskárny.....	35
3	MATERIÁLY	36
3.1	PLA.....	37
3.2	ABS.....	38
3.3	Nylon	39
3.4	PETG	40
3.5	TPU.....	41
3.6	Pryskyřice	42
4	KONSTRUKCE	43
4.1	Mechanická část tiskárny.....	43
4.1.1	Návrh pohybového mechanismu	45
4.1.2	Návrh zdvihacího mechanismu	50
4.1.3	Návrh rámu.....	57

4.2	Elektronická část	59
4.2.1	Hot-End	59
4.2.2	Extruder	60
4.2.3	Tisková podložka	61
4.2.4	Řídící systém	64
5	ZÁVĚR.....	67
	LITERATURA	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75

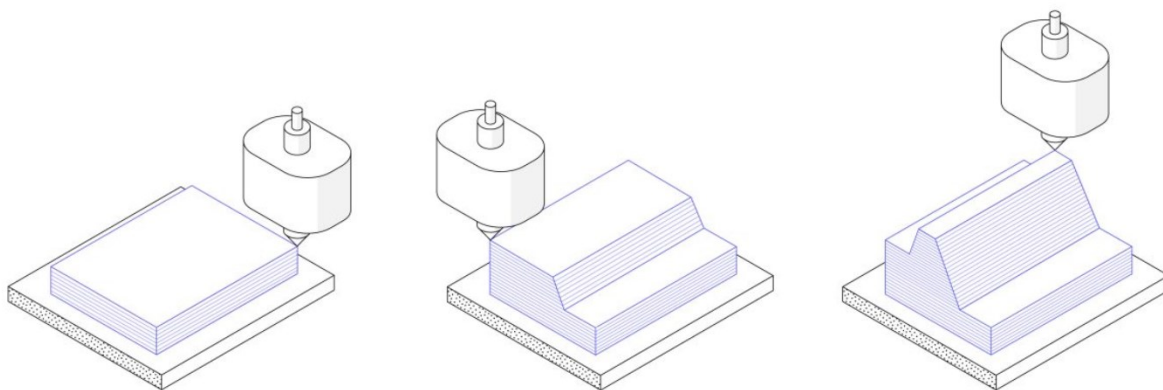
1 ÚVOD

1.1 ADITIVNÍ VÝROBA

Také známo pod názvem 3D tisk je proces výroby, při kterém dochází k transformaci digitálního modelu do tří dimenzionálního reálného objektu postupným stavěním jednotlivých vrstev na sebe, nejčastěji ve vertikální ose. Tato technologie se objevila už v roce 1989, kdy byla patentována společností *Stratasys* a o 3 roky později byla na trh uvedená první komerční tiskárna. V následujících desetiletích byly vyvíjeny další principy, avšak nedocházelo k významným pokrokům hlavně díky drženému patentu, a tak byl nabízený sortiment velmi ojedinelý a díky vysoké ceně se jednalo především o tiskárny využívané v průmyslové oblasti. V roce 2009 však platnost patentu technologie FDM (Fused Deposition Modelling) (Obr. 1) vypršela a došlo k velkému zájmu tuto metodu dále vyvíjet. To mělo za následek vzniku spousty firem (*Ultimaker*, *MakerBot* či dnes největší výrobce 3D tiskáren, *Prusa Research*) a zároveň tak došlo k propadu pořizovací ceny z řádů milionů korun na desetitisíce a objevily se první tiskárny také pro domácnosti.

V dnešní době již existuje plná řada možností, každá má samozřejmě své výhody a nevýhody. Obvykle tyto vlastnosti spočívají v druhu používaného materiálu, rychlosti tisku, objemu tiskové plochy a s tím vším související ceně. Například zmíněné tiskárny typu FDM pracují na principu nanášení roztaveného plastu prostřednictvím trysky do jednotlivých vrstev, industriální tiskárny typu SLS (Selective Laser Sintering) využívají laser k tavení tenké vrstvy plastového či kovového prášku.

Co se řadí jako velmi významné plus technologie 3D tisku je možnost výroby dílu téměř jakékoliv geometrie. Avšak stále lze najít jistá omezení a pravidla, která se musí dodržet pro danou metodu. Jedním takovým příkladem je velmi těžká proveditelnost součástí s materiálovými vlastnostmi srovnatelnými s obráběným výrobkem na CNC stroji. Tento nedostatek je vyvážen velmi nízkou cenou výroby, kde nezáleží, zda se jedná o kusovou či sériovou výrobu. Z těchto vlastností je jasné, že tato technologie má největší využití v oblasti produkce prototypů. [1], [2]

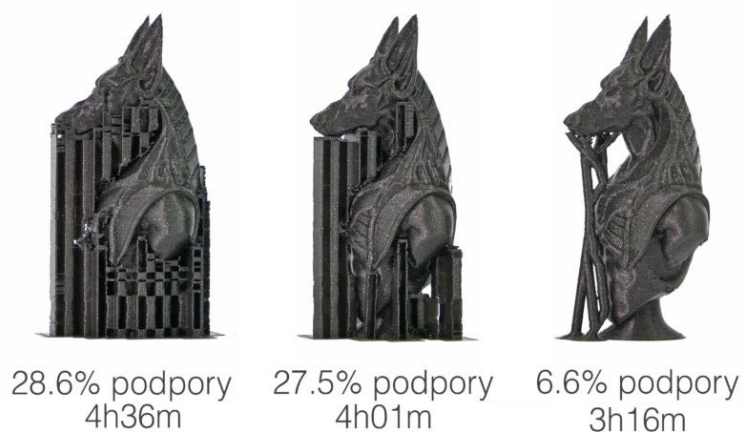


Obr. 1) Princip technologie FDM

1.2 VÝHODY A NEVÝHODY 3D TISKU

Jak již bylo zmíněno, princip obvykle spočívá v nanášení jednotlivých vrstev na sebe, tudíž je potřeba následující vrstvu na co položit. Zpravidla by se mělo předejít tisku převisů s úhlem přesahujícím 45° , v opačném případě se využívá současnému vytištění i tzv. podpory (Obr. 2). Jsou buďto ze stejného materiálu a následně se odlamují, mohou být i z jiného, chemicky odbouratelného materiálu, a jsou z modelu vyplaveny. Tvary lze navrhovat a optimalizovat na nejvyšší účinnost bez ohledu na cenu výroby, která je zpravidla mnohonásobně nižší než při tradičním obrábění. Součást se složitými geometrickými prvky (Obr. 3) mnohdy nemůže být vyrobena ani jiným dostupným způsobem.

Problematikou je však přesnost vyrobené součásti, která se pohybuje u desktopových tiskáren v rozmezí $\pm 0,5 \%$ rozměru, u průmyslových tiskáren $\pm 0,1 \%$ rozměru. Také odstraněné podpory mohou zanechat viditelné stopy, které snižují kvalitu povrchu. [2], [3], [4]



Obr. 2) Různé typy podpor a jejich vliv na dobu tisku



Obr. 3) Geometrická struktura pro optimalizaci pohlcování zvuku

Při odlévání či injekčním vstřikováním do forem je potřeba pro každou unikátní součást také příslušná forma. Rozhodně se tedy nevyplatí při kusové výrobě, kterou dokonale zastupuje aditivní výroba. Zejména nejsou potřeba žádné speciální nástroje a jsou-li pominuty pořizovací náklady tiskárny, samotný tisk stojí pouze spotřebovaný materiál a elektrická energie, přičemž většina domácích tiskáren nespotřebuje více energie než obyčejný PC. Je potřeba podotknout, že občas je potřeba provést post-processing, tedy finální úpravu vytištěného dílu.

Velké využití má tak v oblasti prototypové výroby, kdy je komponent k dispozici do několika hodin a je rapidně urychlen designový vývoj – návrh, testování, vylepšení (Obr. 4). Ačkoliv se nejčastěji tiskne z plastu, 3D tisk si drží odpadovost pod 10 % a nedochází ke zbytečnému plýtvání materiálu.

Naopak v sériové výrobě, obvykle u série přesahující 100 kusů, se již technologie 3D tisku nevyplácí a je lepší využít efektivnější metodu.

Ovládání tiskárny je vesměs intuitivní, vyžaduje tak pouze operátora, který stiskne tlačítko. Celý stroj pak plní automatizovaný proces. Oproti obrábění, které typicky vyžaduje zručného pracovníka, jsou náklady na pracovní sílu bezvýznamné. [2], [3], [5]



Obr. 4) Vývoj produktu využitím tištěných prototypů

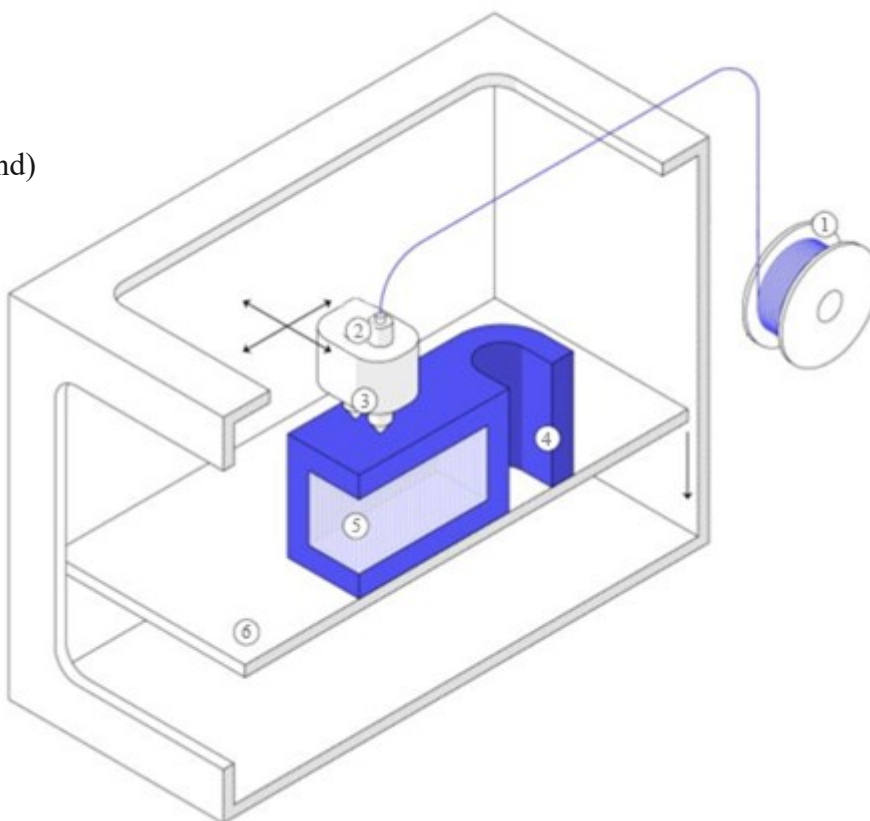
2 METODY 3D TISKU

2.1 FDM – FUSED DEPOSITION MODELLING

Jedná se o nejrozšířenější metodu 3D tisku, tzv. materiálovou extruzi (Obr. 5). Drát z termoplastu je namotán na cívce (filament) je zaveden do tiskárny do podavače (extruder). Podavač je spojen s hlavou trysky (hot-end) a to napřímo (direct drive) anebo je umístěn libovolně na rámu tiskárny a s hlavou je spojen teflonovou trubicí (bowden drive). Hlava je nejčastěji složena z hliníkového bloku osazeného topným tělesem a termistorovým článkem, kdy na jednom konci tohoto bloku je osazena tryska a na druhém vhodný chladič.

Trysku je tak možné nahřívat na požadovanou teplotu (obvykle v rozmezí 190 – 280°C, ovlivněno tavným bodem použitého termoplastu) a přes podavač je do ní tento filament podáván a následně taven. U nepřímě umístěného podavače je zde trubice pro přesné vymezení cesty k tiskové hlavě. Dle typu konstrukce se tisková hlava může pohybovat až ve všech třech osách kartézského souřadného systému (x, y, z). Tavený plast je otvorem v trysce nanášen na dokonale rovnou tiskovou podložku (hot-bed), která může být zároveň vyhřívaná pro zpomalení ochlazování již naneseného materiálu, v rovině XY do vrstvy a jakmile je tato vrstva dokončena, opět dle konstrukce se posouvá hlava či podložka ve vertikálním směru a vytváří se následující vrstva. Termoplast ve vrstvách postupně tuhne, čímž vzniká produkt. [1] [5] [9]

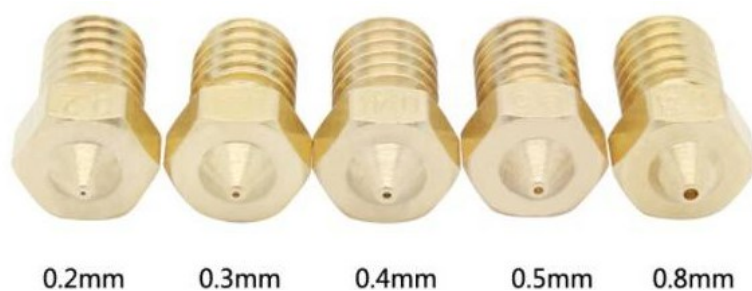
- 1 – Cívka s materiálem
- 2 – Podavač (extruder)
- 3 – Tisková hlava (hot-end)
- 4 – Tištěný díl
- 5 – Tištěné podpory
- 6 – Podložka



Obr. 5) Schéma tiskárny využívající metodu FDM

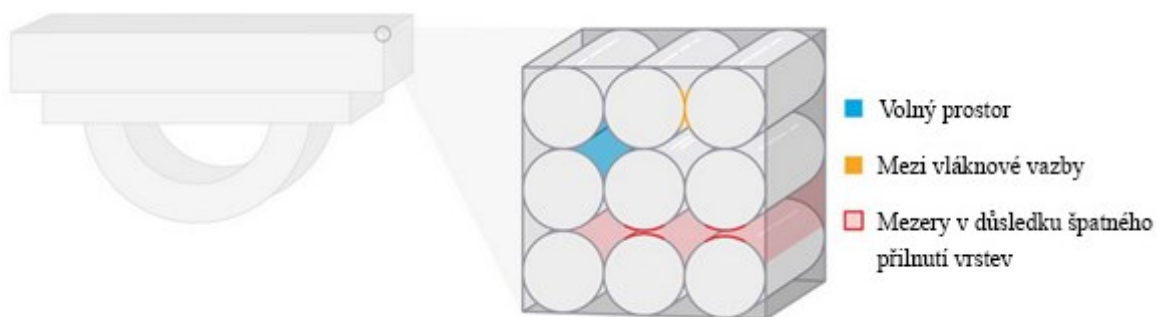
Z mnoha lze konfigurovat například nastavení teplot trysky a podložky, rychlost tisku, výšku a šířku jednotlivých vrstev, šířku stěn či hustotu výplně. Všechna tato nastavení se provádí v počítačovém programu, tzv. sliceru, který navrhnutý 3D model rozdělí na jednotlivé vrstvy a všechny informace zformuje do sekvence G-kódu. Řídící deska tiskárny tento kód pak zpracovává, stejně jako na CNC strojích. Komerčně dostupně 3D tiskárny disponují obvykle tiskovým objemem $200 \times 200 \times 200$ mm, u industriálních se lze dostat na mnohem větší prostory. Je také běžné, že se nadrozměrné modely rozdělí na několik menších částí, které jsou následně slepeny, či jinak spojeny. S rostoucí plochou zejména v osách X a Y přibývají problémy, jelikož je žádoucí mít celou tuto plochu ideálně rovnoběžnou s tryskou. Také je potřeba daleko vyšší výkon ohřívače podložky pro dosažení stejné teploty, jako u menších ploch.

Nejčastější výška vrstev se pohybuje v rozmezí $50 - 400 \mu\text{m}$, Nízké vrstvy mají za následek kvalitní povrch, ale za cenu dlouhé doby tisku, tudíž se vždy hledá kompromis. Tato hodnota je ovlivněna hlavně zvoleným průměrem trysky (Obr. 6), obecně používané pravidlo je, aby maximální výška vrstvy byla přibližně 50% šířky otvoru trysky. Zmiňovaným kompromisem je pravděpodobně nepoužívanější typ trysky u desktopových tiskáren s průměrem otvoru 0,4 mm.



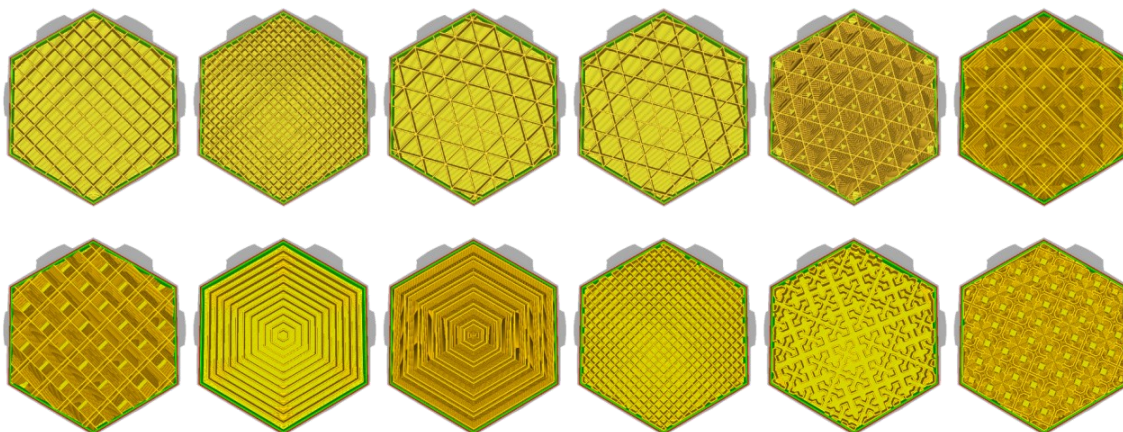
Obr. 6) Různé průměry trysek

Dochází k tomu, že FDM tiskárny vrstvy dokonale nespojují a díl nevydrží v určitém směru tahové namáhání. Na molekulární úrovni je vidět, že každá nanesená linie je složena z vysoce zapleteného polymerního řetězce, avšak není možné zajistit toto spojení i právě mezi těmito liniemi (Obr. 7). Součást je silná ve směru nanášení vrstev, avšak v osách mezi vláknových vazeb a ose kolmé na směru nanášení z různých experimentů vychází, že vydrží přibližně 55% hodnoty zatížení. [1] [10]



Obr. 7) Zobrazení formování vrstev FDM metodou

Součásti nejsou vesměs tištěné jako plné tělo, ale využívá se procentuální výplně různých tvarů (Obr. 8). V praxi se vytiskne ucelená stěna o konstantní tloušťce a zbytek součásti je vyplněn mřížkou. Na každý typ namáhání může být vhodná jiná výplň, je nutné zvážit vhodnost použití. Pro ušetření materiálu a času bývají okrasné prvky tištěné s velmi malou výplní kolem 10 % (Obr. 9). Má svůj význam i u funkčních součástí, jelikož dutým prostorem uvnitř je možné částečně odstranit vnitřní pnutí.



Obr. 8) Možné tvary výplně vnitřního objemu



Obr. 9) Různá hustota výplně

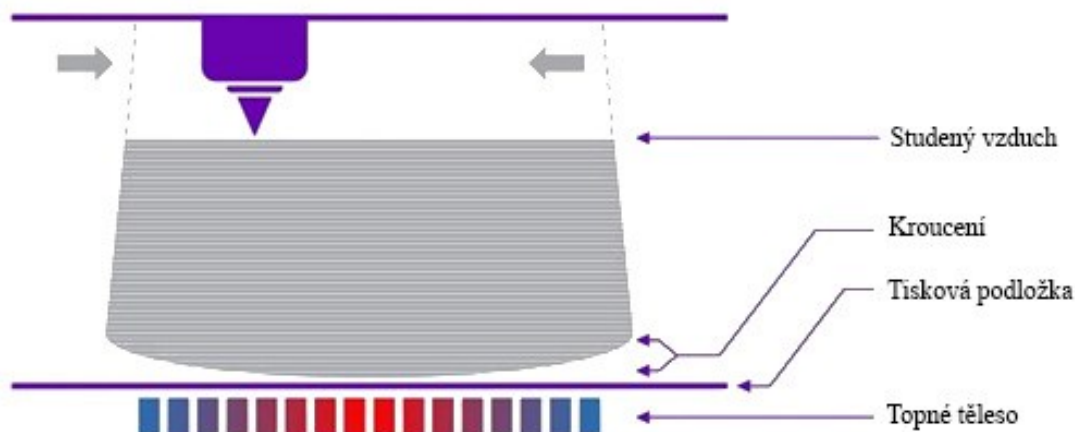
2.1.1 Výhody a nevýhody

- + Jedná se o velmi rozšířenou technologii, náhradní díly jsou dostupné a komplexní stroje neustále vylepšovány
- + Obrovská škála použitelných termoplastů, FDM tiskárny obecně jsou považovány za nejlevnější způsob vytváření prototypů
- Nejmenší rozměrová přesnost ze všech dostupných tiskových metod (nepoužitelné pro funkční díly)
- Jednotlivé vrstvy jsou rozpoznatelné okem, pro dokonalý vzhled je nutný post-processing
- Špatná přilnavost vrstev oproti jiným metodám [4] [5]

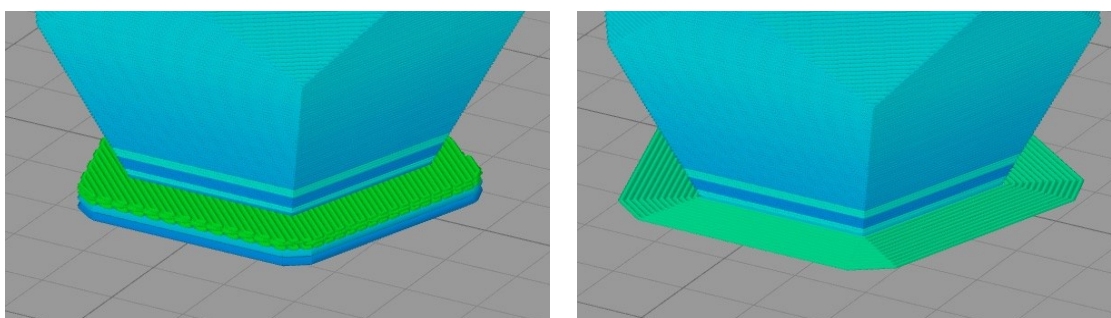
2.1.2 Časté problémy FDM tiskáren

- Zkroucení (warping) naneseného materiálu, způsobený nerovnoměrným tuhnutím plastu (Obr. 10). Termoplasty obecně v určitém teplotním rozmezí mění své vlastnosti. Po roztavení tohoto plastu dochází k expanzi a při jeho přeměně zpět do pevného skupenství se naopak smršťuje. Různé oblasti chladnou jinou rychlostí a studenější vrstvy mají tendenci tahat ještě horké vrstvy, což způsobuje kroucení tvaru tištěného modelu. Obrovskou roli zde hraje dokonale vyrovnaná platforma s využitím vyhřívání, které tuhnutí zpomaluje, a také různých přípravků pro zlepšení adheze plastového dílu k podložce. [5] [7]

Nastavení sliceru nabízí také dvě možnosti lepší přilnavosti a zabránění kroucení dílu. V prvním případě je nejprve vytištěna jakási podstava o výšce několika vrstev (raft), na kterou je následně tištěn samotný model (Obr. 11a). Druhou možností je protažení první vrstvy (brim), čímž získá díl větší základní plochu a hrany na vnějším okraji modelu mají větší přilnavost k podložce. (Obr. 11b). [8]



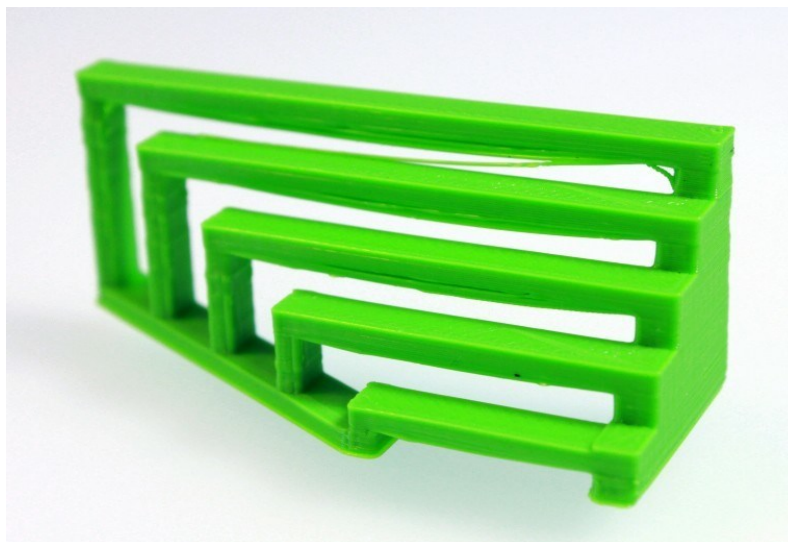
Obr. 10) Kroucení dílů v důsledku špatného tuhnutí vrstev



Obr. 11) a) Raft – podstava pod dílem; b) Brim – prodloužená první vrstva

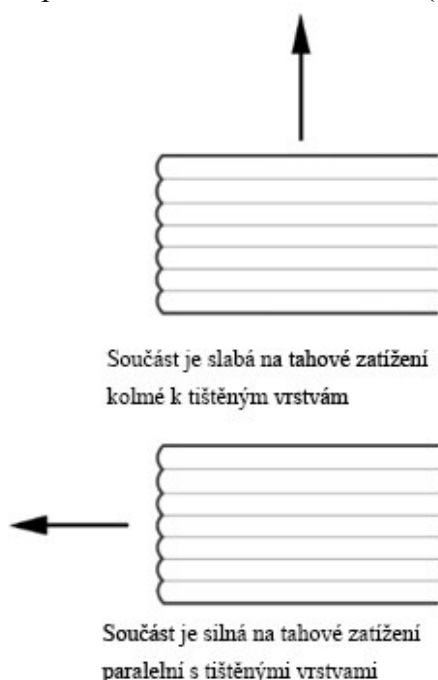
- Mostování (bridging), kdy má tiskárna vytvořit mezi dvěma kotevními body most a tato vrstva nemá na čem ležet a prohýbá se (Obr. 12). Většinou jsou zhotovitelné mosty do délky 10 mm. Pak je nutné snížit vzdálenost kotevních bodů, tedy zkrácení mostu, nebo přidání podpor. Ty se většinou přidávají i na veškeré převisy s úhlem větším než 45° a to buďto z materiálu rozpustitelném v určité chemikálii, to vyžaduje hlavu s více vstupy na materiál, nebo odlamovací ze stejného materiálu, jako je použit pro tisk samotného modelu.

U rozpustitelných podpor je velká výhoda ve snadném odstranění a tištěný povrch je jemný a kvalitní. Nevýhodou je potřeba dalšího než primárního materiálu a pořizovací cena hlavy kompatibilní s vícero materiály najednou. Odlamovací podpory jsou velmi jednoduché na nastavení a lze je tisknout na všech tiskárnách. Nevýhodou je nekvalitní povrch, respektive první vrstva ležící na podpoře. Vždy je lepší model navrhnout tak, aby bylo možné se tisku podpor vyhnout.



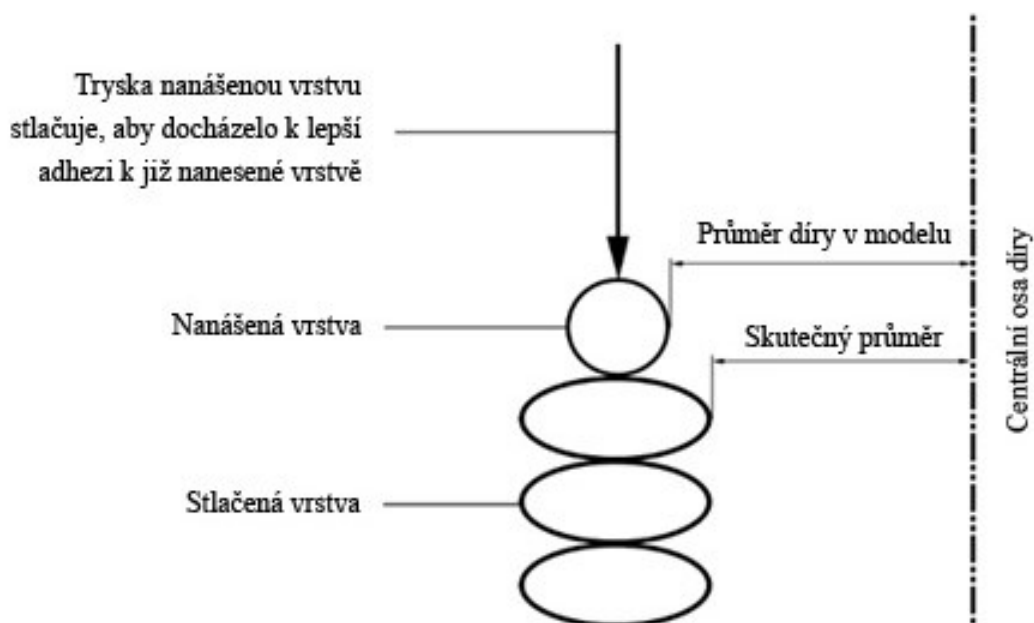
Obr. 12) Vliv délky mostu na průhyb vrstev

Někdy stačí model pouze otočit o 90° a není nutné vytvářet komplikované záhyby, avšak je nutné pamatovat na směr namáhání (Obr. 13a, b).



Obr. 13) – a) Značný vliv směru zatížení na pevnost dílu; b) Identické válce vytištěné v různých orientacích

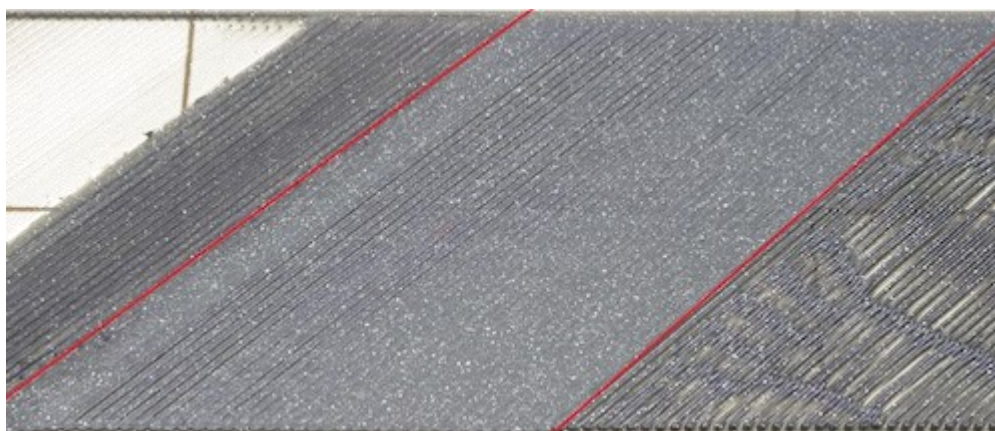
- Vertikální otvory, vzhledem ke snaze hlavy přitlačet nově nanesenou vrstvu na předchozí, aby došlo k lepšímu spojení, čímž dochází k deformaci tvaru vrstvy (Obr. 14).



Obr. 14) Porovnání průměru otvoru ve 3D modelu oproti skutečné součásti

- První vrstva, která je důsledkem špatně nastavené podložky. Ta musí být dokonale rovná a rovnoběžná s tiskovou hlavou po celé ploše. Tisková hlava má buďto přesně definovanou nejnižší pozici, ke které je nastavována podložka, nebo je naopak pevně uložena podložka a vzdálenost je nastavována vertikálním pozicováním tiskové hlavy, například pomocí indukčního snímače. Mezi tryskou a podložkou by měla být dostatečná mezera pro nanášení první vrstvy, pro manuální nastavení se používá vzdálenost listu tvrdého papíru, tedy přibližně 100 μm , u snímače je tato hodnota nastavena ve firmware.

Správně zvolená vzdálenost je často nastavována experimentálně, podle kvality první vrstvy lze rozeznat správná konfigurace (Obr. 15).



Obr. 15) Zleva – tryska je moc blízko podložky, ideální vzdálenost, tryska je moc vysoko (ztráta přilnavosti)

2.1.3 Používané tiskárny

- Nejpoblárnější a zřejmě nepoužívanější tiskárnou po celém světě je momentálně **Prusa i3 MK3S** (Obr. 16), dle oficiálních stránek [33] popsána následovně

„Original Prusa i3 MK3S je nástupcem světově oceňovaného modelu Original Prusa i3 MK2. S vylepšeným extruderem, řadou nových senzorů a revoluční magnetickou vyhřívanou podložkou MK52 s vyměnitelnými PEI tiskovými pláty jde o nejlepší 3D tiskárnu, jakou jsme dosud vyrobili!“

Jsou nabízeny buďto jako stavebnice, či již sestavené a otestované. Za cenovku kolem 20 tisíc korun poskytují spolehlivý a přesný tisk. Velkou popularitu mají především i díky nonstop technické podpoře pro zákazníky.



Obr. 16) Tiskárna Prusa i3 MK3S

- Jakousi konkurenci představuje i čínská společnost Creality3D, vyrábějící mnoho cenově dostupných tiskáren. Jednou z nich je i **Creality Ender 3 PRO** (Obr. 17). Pořizovací cena je oproti Prusa tiskárně téměř třetinová, je však vhodná především pro začátečníky a nenáročné, především kvůli použití levných a méně kvalitních materiálů v konstrukci. [34]



Obr. 17) Tiskárna Creality Ender 3 PRO

- Takzvanou Plug&Play tiskárnu nabízí holandská firma Ultimaker, fungující již od roku 2010, tedy začátků rozvoje technologie FDM. Tiskárny s označením Ultimaker S3 (Obr. 18) jsou velice intuitivní na ovládání a poskytují vysoce kvalitní tisk a zároveň skvělé designové zpracování stroje. Vysoká kvalita je ohodnocena i vysokou cenou kolem 100 tisíc korun, jsou vhodné spíše pro podniky než běžné uživatele. [35]



Obr. 18) Tiskárna Ultimaker S3

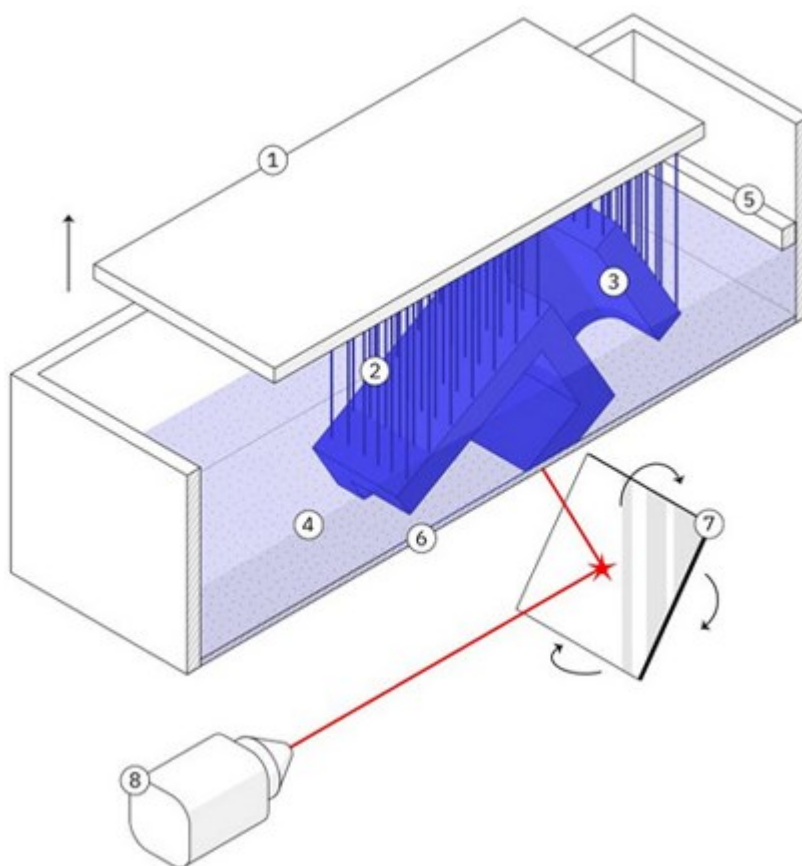
2.2 SLA – STEREOLITOGRAPHY

Jedná se o technologii progresivního vytvrzování polymerů vlivem záření o určité vlnové délce, nejčastěji UV světlem. Tisková platforma je umístěna v nádrži s kapalným foto reaktivním polymerem (pryskyřicí) ve vzdálenosti o výšce jedné tištěné vrstvy od povrchu tekutiny. Namísto tiskové hlavy s tryskou je u této metody hlavní složkou UV laser, který vytvrzuje tuto pryskyřici v jedné vrstvě prostřednictvím naklápěcího zrcadla v osách X a Y, čímž je laserový paprsek přesně namířen na tištěnou oblast (Obr. 19, 20). Po dokončení vrstvy se tisková platforma posouvá do dostatečné vzdálenosti, aby mohl stěrač srovnat hladinu pryskyřice. Následně je tištěná další vrstva a celý proces se opakuje, dokud není díl zhotoven.

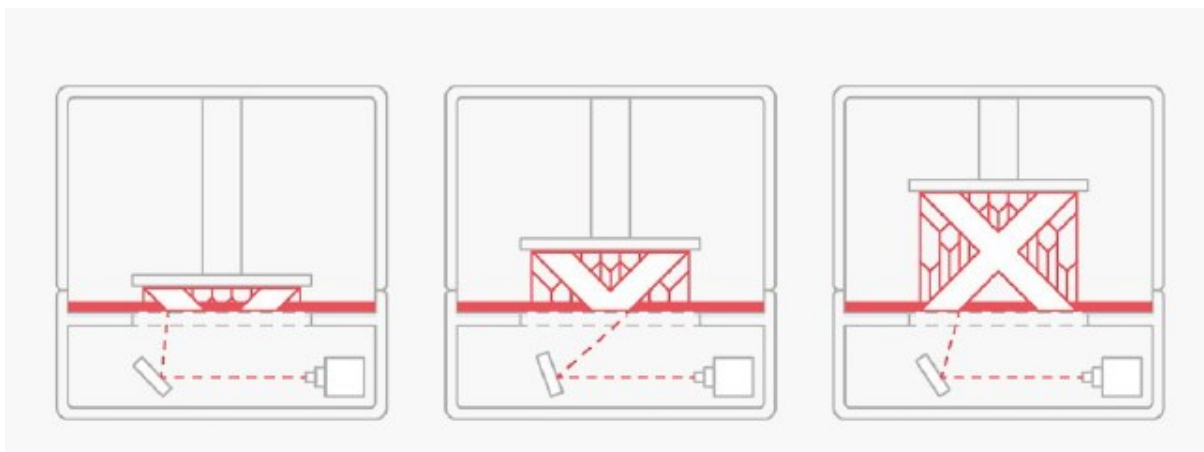
Je vhodné věnovat součásti i následný post-processing. Tiskárny vyžadují zejména tisk s podporami, které u této metody nelze kombinovat s jiným, rozpustitelným, materiálem a je tak vyžadováno jejich manuální odstranění, vybroušení nerovností. S tím souvisí nutnost vhodného umístění této podpory konstruktérem, aby nedošlo zbytečně k narušení povrchu, na který je kladen důraz na vzhled. Jsou-li vyžadovány lepší mechanické a termální vlastnosti, je takto opracovaný díl vystaven dalšímu zdroji UV světla.

SLA tiskárny se vyznačují vysokou rozměrovou přesností s velmi hladkými povrchy tištěných dílů. K dispozici je početná škála materiálů, respektive přidáním aditiv do pryskyřice lze získat materiály odolné opotřebení či vysokým teplotám, flexibilní, šperkařské, dentální anebo keramické. [1], [10], [11]

- 1 – Tisková podložka
- 2 – Strukturované podpory
- 3 – Tištěný díl
- 4 – Tekutý fotopolymer
- 5 – Stěrač
- 6 – Průhledná stěna
- 7 – Naklápěcí zrcadlo
- 8 – UV laser



Obr. 19) Schéma tiskárny využívající metodu SLA

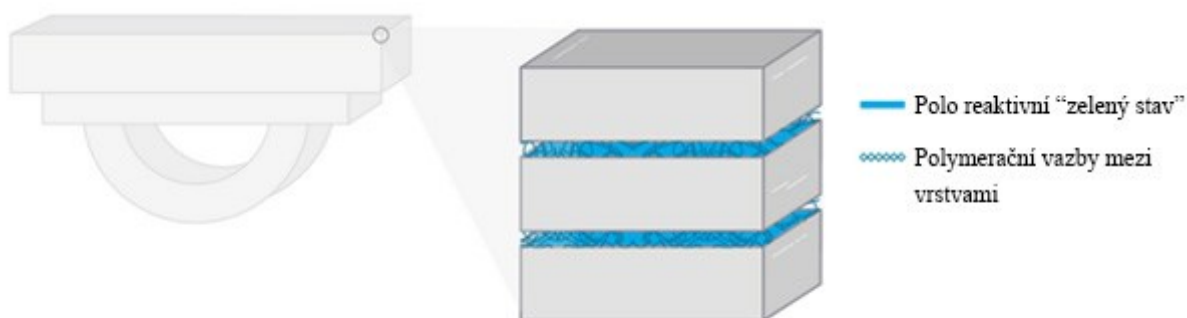


Obr. 20) Proces tisku metodou stereolitografie

Existuje také odvozená metoda DLP (*digital light processing*), kde je významným rozdílem použití digitální projekce obrazu celé vrstvy a ta je vytvrzena najednou. Tento obraz je tvořen pixely, výsledná vrstva je tedy také zformována z malých čtverečků. Metodou DLP je výrazně zkrácen čas tisku, jelikož nejsou vrstvy vytvářeny jedním laserovým paprskem obíhajícím definovanou trasu.

Tiskárny nenabízí příliš modifikací parametrů. Nastaví se pouze rozlišení (výška vrstvy), typ materiálu, orientace 3D modelu a výskyt podpůrného materiálu. Vše ostatní je přímo definováno v řídicím systému tiskárny.

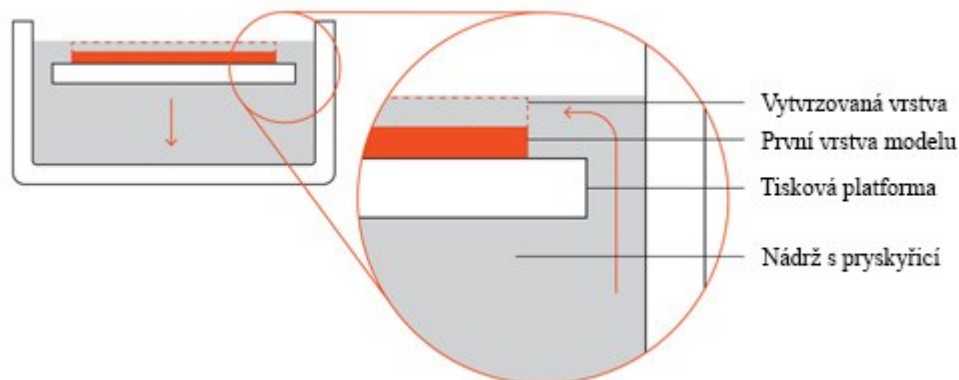
Vytištěný díl je vysoce izotropní, tedy nezáleží na směru zatížení, jako je tomu u FDM metody. Je to způsobené tím, že mezi chemickými vazbami vytvářejícími jednotlivé vrstvy a mezi silami držícími vrstvy u sebe není výrazný rozdíl. Vrstvy vznikají tzv. polymerací, kdy pryskyřičné monomery reagují a vytvářejí mezi sebou kovalentní vazby s vysokou pevností. Avšak tato polymerace není dokončena kompletně, tiskárna vytvářející se vrstvu zanechává v polo reaktivním stavu, který se nazývá „zelený stav“. Na povrchu nově vytvořené vrstvy se tak stále vyskytují polymerizovatelné skupiny, na které se kovalentně naváže následující vrstva (Obr. 21). Proces polymerace je následně možné dokončit vystavením již vytištěného dílu zdroji UV světla. [10] [11]



Obr. 21) Model vytištěný na SLA tiskárně je uceleným polymerem

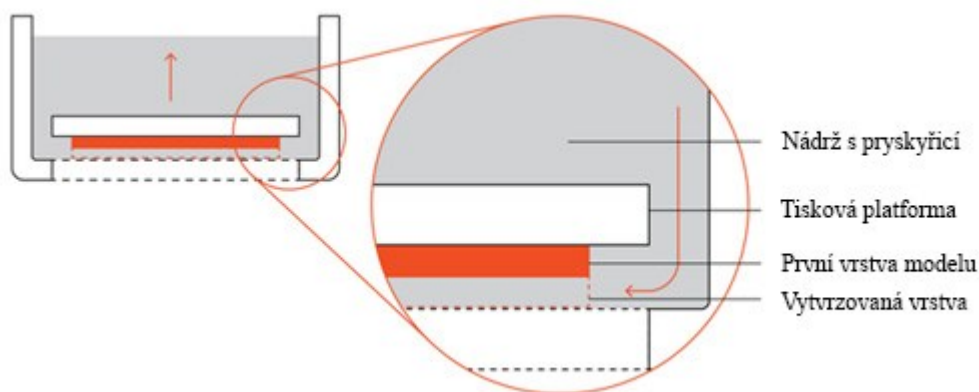
Existují dvě používané konstrukce, první z nich používá pohyb tiskové platformy z vrchu dolů, druhá zespoda nahoru.

Klesající platforma využívá laser umístěný nad nádrží a nabízí spoustu výhod, jelikož dochází k postupnému spouštění výtisku do pryskyřice (Obr. 22). Model je možné tisknout v jakékoliv orientaci, nejčastěji kdy je osa Z modelu současně svislou osou při tisku. Je výrazně snížen počet vrstev a množství generovaných podpor, což má za následek ušetření celkového tiskového času. Nabízí obrovskou tiskovou oblast bez výrazné ztráty přesnosti tisku. Pokročilost systému má za následek vysokou pořizovací cenu.



Obr. 22) Schéma SLA tiskárny využívající klesající platformu

U druhého typu konstrukce je laser umístěn pod nádrží a jednotlivé vrstvy jsou tištěny na dnu, přičemž platforma stoupá nahoru (Obr. 23), díl je tak tištěn opačně orientován (tzv. „vzhůru nohama“). Dno nádrže je z materiálu propouštějící světlo. Jelikož se platforma zvedá, je nutné každou vrstvu oddělit, a aby nedocházelo k jejímu přilepení, je dno navíc ošetřeno silikonovým povlakem. Přesto občas dochází k nedokonalému oddělení této vrstvy a odlomek zachovaný na dně nádrže má za následek selhání tisku. Snahou je model tisknout na podporách, naklopený vůči tiskové platformě, aby došlo k minimalizaci průřezu v ose Z a tištěné vrstvy byly co nejmenší. Mnoho ovládacího software disponuje funkcí automatického umístění modelu v závislosti na jeho geometrii. Tento typ konstrukce je nejčastěji využíván, jelikož je tiskárna jednodušší na výrobu a tím je dostupnější i pořizovací cena. Nevýhodami jsou omezená tisková plocha a nutný post-processing tištěného dílu. [1] [11]



Obr. 23) Schéma SLA tiskárny využívající stoupající platformu

2.2.1 Výhody a nevýhody

- + Vysoká rozměrová přesnost s možností tisknout i složité detaily
- + Hladký a jemný povrch, vhodné pro tisk prototypů s vizuálními požadavky
- + Široká škála dostupných materiálů
- Vytisknuté díly bývají pevné, avšak křehké
- Mechanické vlastnosti a vzhled po čase degradují, především po vystavení slunečnímu svitu
- U cenově dostupných tiskáren je téměř nutný tisk s podporami, což vyžaduje jejich následné manuální odstraňování

2.2.2 Používané tiskárny

Jedna z nejlépe hodnocených a také cenově dostupných je čínská tiskárna Anycubic Photon. Jedná se o desktopové zařízení i do domácnosti, je konstruována se stoupající platformou a nabízí celkový tiskový prostor o rozměrech $115 \times 65 \times 155$ mm s minimální výškou vrstvy 25 mikronů. I přes relativně nízkou cenu je vybavena barevným dotykovým displejem a vlastním software. Jako vstupní materiál využívá foto reaktivní pryskyřici 405 nm. [36]



Obr. 24) SLA Tiskárna Anycubic Photon

Oblíbená tiskárna v průmyslovém odvětví je *Formlabs Form 3*. Jedná se o tiskárnu s poněkud vysokou cenou, mimo základní balení společnost nabízí i balíček tiskárny společně s automatizovanou vytvrzovací, respektive čistící, stanicí. Tisk je možný z široké škály modifikované foto reaktivní pryskyřice poskytující různé mechanické či estetické vlastnosti. Samotný tisk probíhá na objemu $145 \times 145 \times 185$ mm a vytvrzování pryskyřice je uskutečněno UV laserem o výkonu 250 mW. Tiskárna má svůj vlastní, uživatelsky komfortní software s mnoha funkcemi, jako například automaticky generující podpory ihned po vložení modelu. [37]



Obr. 25) SLA Tiskárna Formlabs Form 3

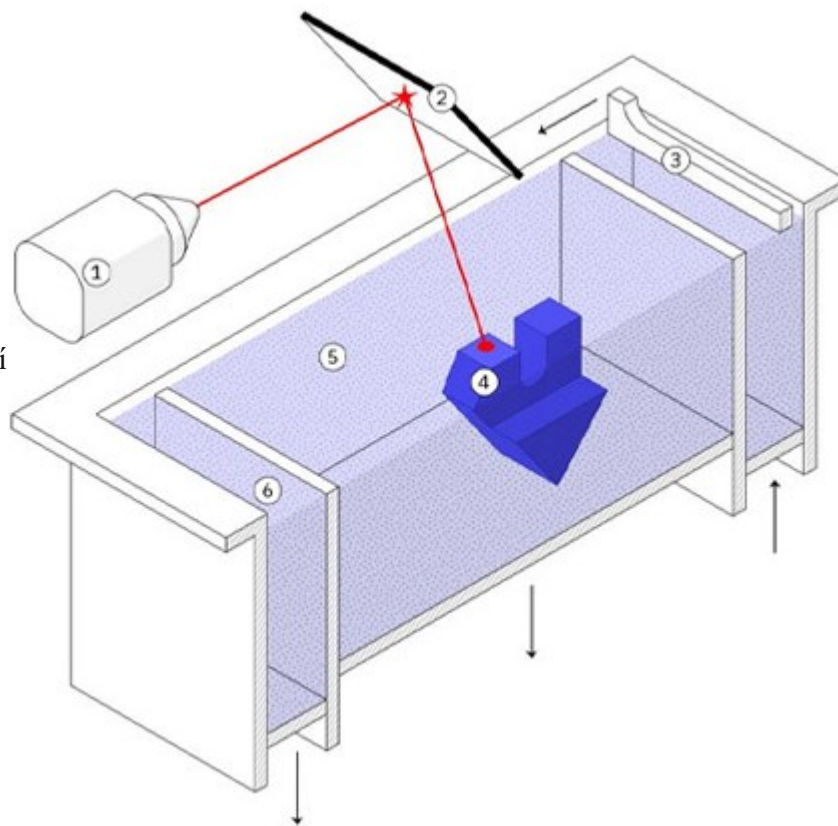
2.3 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING

Technologie využívá pevné práškové materiály, které jsou vysoce výkonným laserem spékány do jednotlivých vrstev (Obr. 26, 27, 28). Používanými materiály jsou termoplasty (nejčastěji nylon), ale lze takto spékat např. i kovy, keramiku či sklo. Prášek je uložen v nádobě, stavební jednotce, kde je ohříván na teplotu blízkou tavnému bodu. Stírací zařízení pak rozprostírá tenkou vrstvu tohoto prášku v celé ploše tiskové platformy, kde je laserovým paprskem spečena plocha řezu vstupního modelu. Obdobně jako u SLA metody je i zde využíváno naklápěcí zrcadlo k usměrnění paprsku na definovanou trajektorii. Po dokončení vrstvy klesá tisková podložka o přesně stanovený úsek níže a celý proces se opakuje až po zhotovení výrobku.

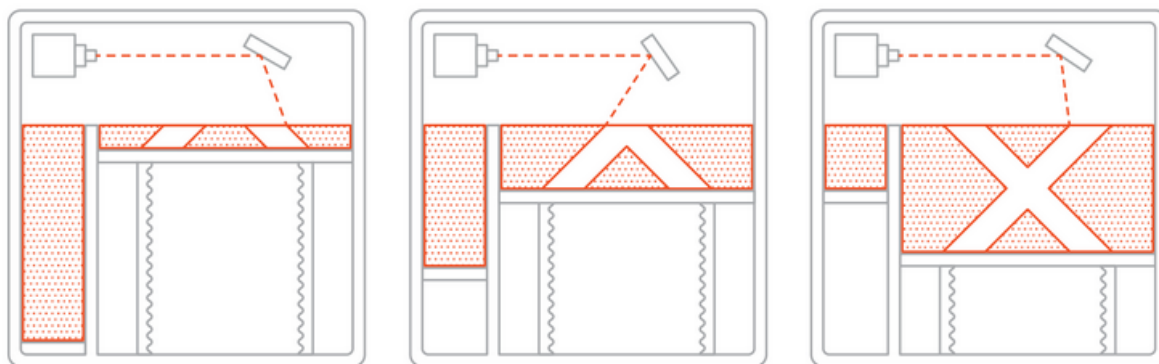
Velká část zbylého práškového materiálu, který nebyl spečen, zůstává nadále v tiskové platformě. Po celou dobu tisku je tak model tímto materiálem obklopen a není potřeba vytvářet podpurné stěny. Zhotovené díly jsou srovnatelné kvality dosažené konvenčními metodami obrábění, u tisku je však možnost vytvářet produkty velmi složitých a detailních tvarů.

Velmi důležitým faktorem je efektivní umístění tištěného modelu v tiskové platformě. Každá tiskárna má přesně definované rozměry této nádoby, proměnná určující délku tisku je pak výška, o kterou je nutné platformu snížit. U součástky o výšce 200 mm a výchozí výšce vrstvy u SLS tiskáren 100 mikronů je nutné zhotovit 2000 vrstev nezávisle na velikosti tištěné plochy či na počtu těchto součástek vedle sebe. Tiskárny jsou vybaveny software s automatickým dopočítáváním optimálního umístění modelu. [1][12][15]

- 1 – Laser
- 2 – XY zrcadlo
- 3 – Zásobník se stěračem
- 4 – Tištěný díl
- 5 – Tisková platforma
- 6 – Zásobník pro překypující materiál



Obr. 26) Schéma tiskárny využívající metodu SLS

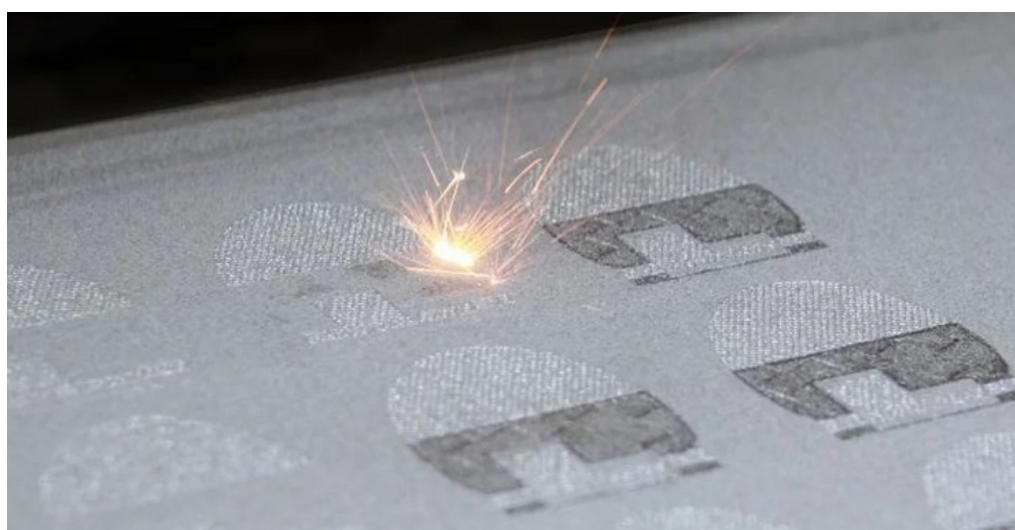


Obr. 27) Proces tisku metodou laserového sintrování

Zejména pak nastavení průměru laserového paprsku a výšky vrstvy, mají vliv na výslednou kvalitu, jelikož společně definují jemnost povrchu a rozměrovou přesnost dílu.

Společnost Hewlett-Packard vytvořila odvozenou metodu MJF (*Multi Jet Fusion*), která se liší od použitého zdroje záření. Namíchaný práškový materiál v požadovaném množství se čerpá ze stavební jednotky a každá nová vrstva je nanесena na tiskovou podložku. Využívá se technologie nanášení tzv. tekutých agentů na prášek, absorbujících infračervené světlo ze světelného zdroje procházejícím v prostoru nad tiskovou platformou. Je tak spečena pouze ta část označená speciálním inkoustem.

Po skončení tisku je stavební jednotka uskladněna v post procesním zařízení, které celou jednotku ochladí a odstraní nevyužitý materiál, který je automaticky namíchan pro opětovné použití. Výtisky je možné po ochlazení pískovat a následně provádět finální povrchové úpravy. Jsou využívány materiály s jemným zrnem, kdy lze vyrábět díly s velmi nízkou pórovitostí. Tato technologie je ideální pro vytváření funkčních prototypů a malosériovou výrobu. [12][13][14]



Obr. 28) Detailní pohled na spékání prášku CO2 laserem metodou SLS

2.3.1 Výhody a nevýhody

- + Vysoká rozměrová přesnost, ideální metoda pro tisk funkčních dílů
- + Možnost výroby modelů s komplexní geometrií
- + Kvůli absenci podpor nejsou na povrchu výtisků jejich pozůstatky
- Technologie zaměřená na průmyslové tiskárny s vysokou pořizovací cenou
- Nutné neustálé ohřívání a chlazení stavební jednotky, což prodlužuje dobu tisku
- Tendence výtisků smršťovat se v průběhu ochlazování, nutné s tím počítat při návrhu dílu a zvětšit celkový objem o 3-4 % [1][15]

2.3.2 Používané tiskárny

Za cenu kolem čtvrt milionu korun nabízí společnost *Formlabs* model *Fuse 1* (Obr. 29), hodnocenou jako jedna z nejlepších tiskáren metodou SLS. Tisk je dostupný z materiálu s označením Nylon 12, kdy je momentálně ve vývoji ještě alternativa s označením Nylon 11. Vytisknuté díly jsou maximálně izotropní a výrobce uvádí dosahovanou pevnost 50 MPa a odolnost vůči teplotám až 154 °C. Maximální rychlost tisku je uváděna až 10 milimetrů za hodinu na výšku, zde záleží na zaplněnosti tiskové podložky. Prášek je spékán laserem o výkonu 2 kW a je možné tisknout až s 50% recyklovaného, nevyužitého prášku.

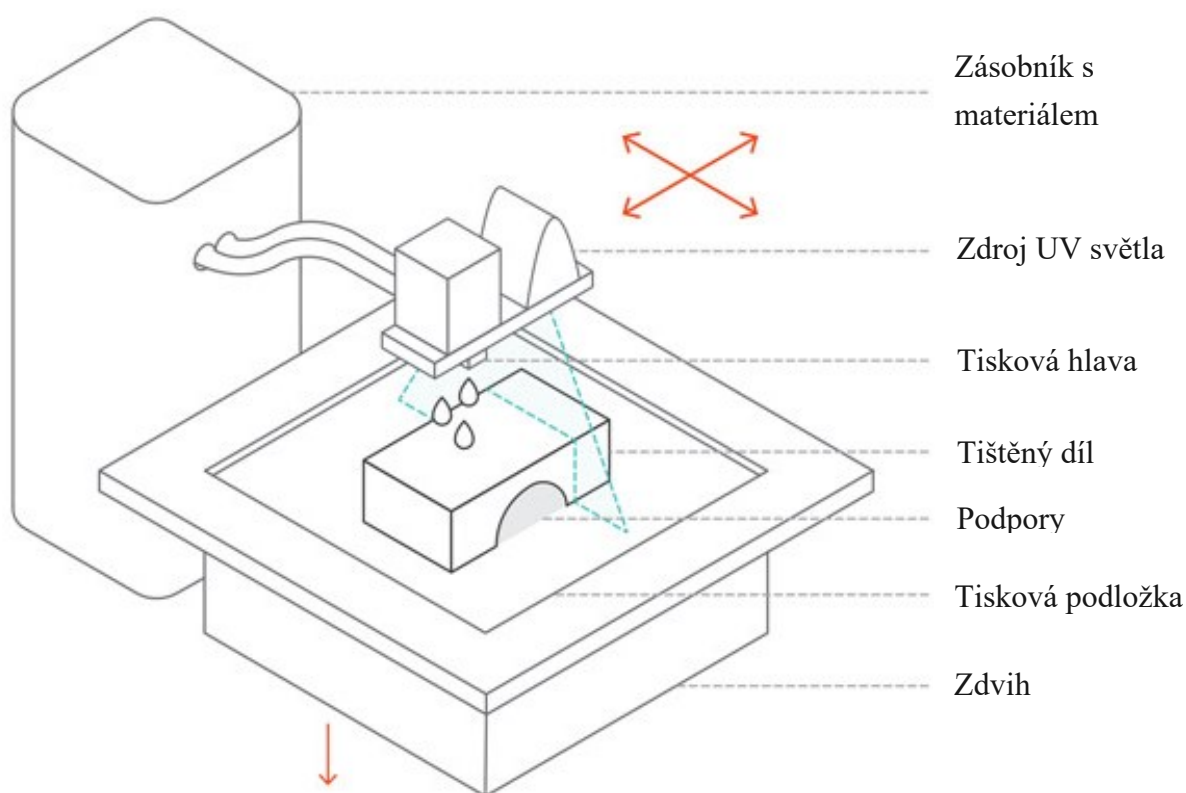


Obr. 29) SLS Tiskárna Formlabs Fuse 1

2.4 MJ – MATERIAL JETTING

Tato technologie je považována za jednu z nejrychlejších a zároveň kvalitních metod 3D tisku. Kombinuje funkce klasických 2D inkoustových tiskáren, které jsou implementovány do tiskové metody SLA. Proces probíhá nanesením tekutých kapek fotopolymery na podložku, které jsou následně UV světlem vytvrzeny (Obr. 30). Nejprve je zapotřebí tento fotopolymer zahřát na teplotu kolem 50 °C, aby měl dostatečnou viskozitu. Následně je tiskovou hlavou, která je velmi podobná té z typické inkoustové tiskárny, nanesen na požadovaná místa a UV zdroj světla tyto místa ozáří, čímž se vytváří vrstva. Tisková podložka se pak spouští o jednu vrstvu níže a celý proces se opakuje. Samotné vrstvy mají vysoké rozlišení, obvykle se pohybuje jejich výška mezi 16 a 32 mikrony. Zároveň je celý mechanismus ohromně přesný s nejvyšší hodnotou rozměrové tolerance výtisků $\pm 0,1 \%$. Celá operace probíhá při pokojových teplotách, tudíž nedochází ke kroucení výtisků vlivem ochlazování, jako je tomu u jiných metod. [16]

Velkou výhodou je snadný více materiálový či více barevný tisk. Ten probíhá jak na úrovni tiskové plochy, kdy může být každá samotná součást vytištěna z jiného materiálu či barvy, nebo na materiálové úrovni, kdy lze vytvořit smícháním dvou a více fotopolymery jakýsi vlastní materiál se specifickými vlastnostmi. Nutné podotknout, že pro tento multi materiálový tisk je potřeba objekt v modelovacím software rozdělit a uložit každou materiálově odlišnou část jako samostatný soubor.



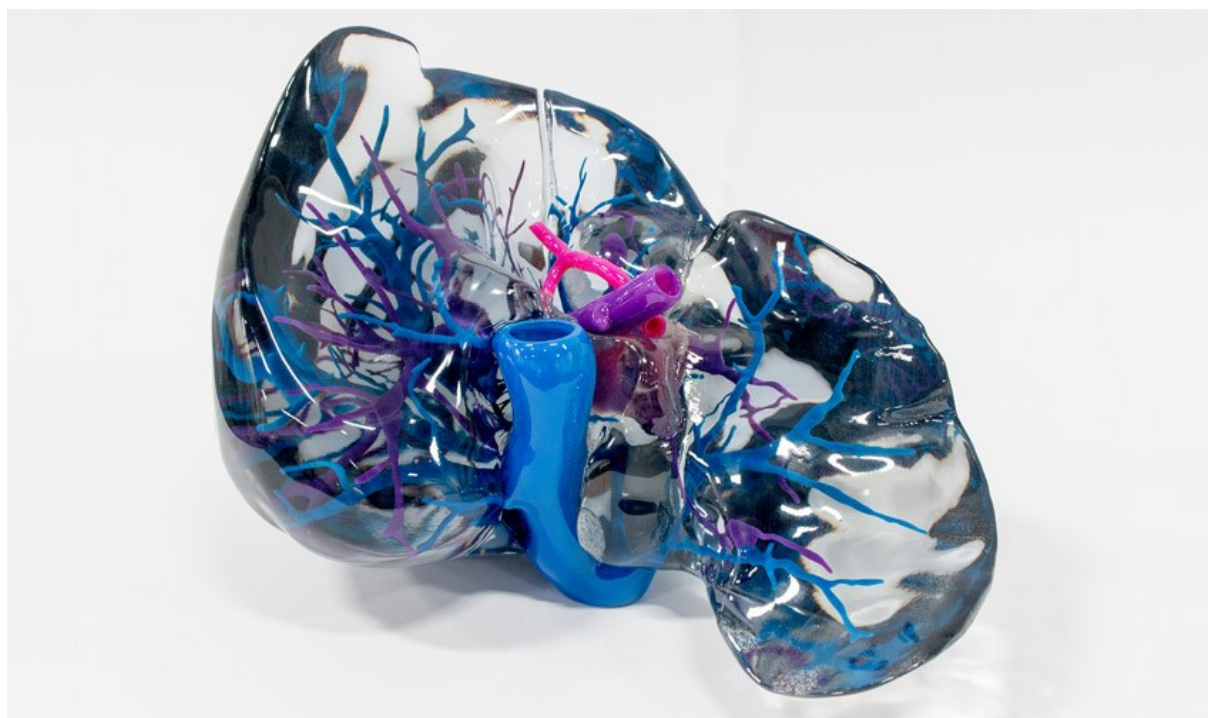
Obr. 30) Schéma tiskárny využívající metodu MJ

U této metody je výhoda využití pro tisk přídavných podpor jiného, vodou či chemicky odplavitelného materiálu, který lze šetrně odstranit. Lze předem zvolit nastavení tisku podpor kolem celého modelu, kdy tiskárna i když to není potřeba, vytvoří kolem dílu tenkou vrstvu podpůrného materiálu a výsledný povrch je pak matný. Druhou volbou je tisk s lesklým povrchem, kdy tento materiál v místech, kde není vyžadován, není ani použit. [17]

2.4.1 Výhody a nevýhody

Vysoká přesnost a rychlost tisku

- + Možnost vytvářet více součástí najednou bez ovlivnění tiskové doby oproti tisku pouze jedné samotné
- + Velmi hladký povrch, ideální pro estetické prototypy na prezentace (Obr. 31)
- + Snadný více barevný tisk či možnost kombinovat materiály
- Vysoká pořizovací cena
- Vytisknuté součásti nedosahují velké pevnosti a jsou velmi křehké, nevhodné pro funkční díly
- Používané materiály jsou citlivé na sluneční záření a vlastnosti časem degradují



Obr. 31) Ukázka vytištěného modelu technologií Material Jetting

2.4.2 Používané tiskárny

Nejlépe hodnocená tiskárna, ale zároveň s cenou v řádech milionů je *Stratasys PolyJet J750* (Obr. 32). Firma stojí za celým vývojem 3D tisku, kdy její zakladatel sestrojil a nechal si patentovat první tiskárnu vůbec. Jak již napovídá vysoká pořizovací cena, zajisté se jedná o průmyslovou tiskárnu. Nabízí plnou škálu materiálů ve více než 360 000 různých barvách, přičemž dokáže najednou tisknout až z 5 různých barev či 6 různých materiálů. Kompletní stroj je robustní s rozměry přes metr v každém směru a váží 430 kilogramů. Dokáže tisknout v maximálním objemu $490 \times 390 \times 200$ mm s výškou vrstvy 14 mikronů a maximální rozměrovou přesností 200 mikronů. [38]



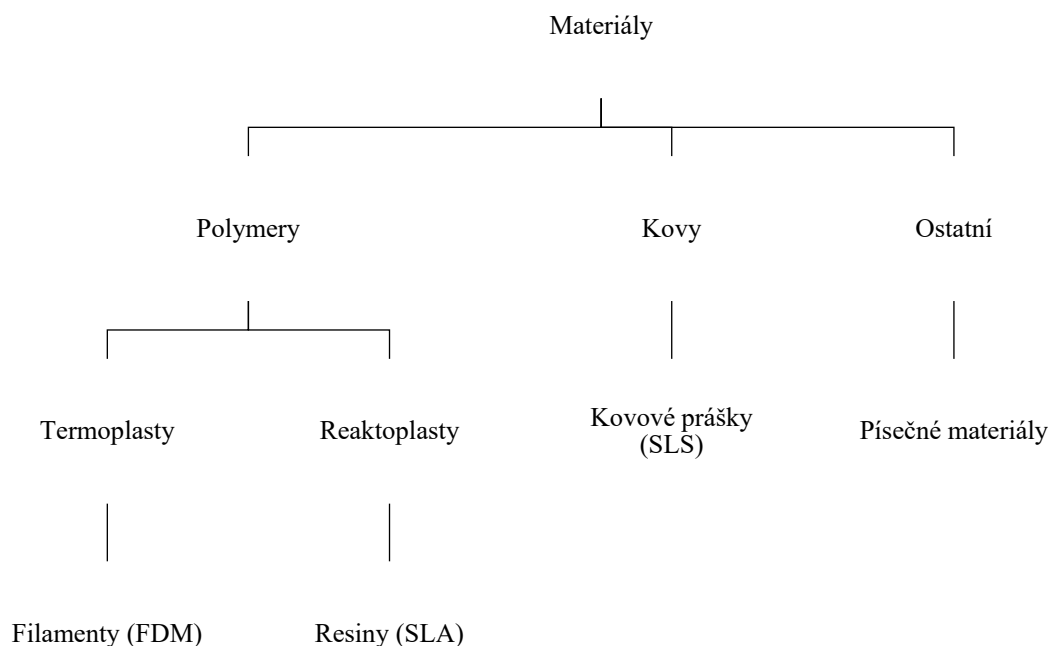
Obr. 32) Tiskárna Stratasys PolyJet J750

Americká společnost nabízí i model *Objet30 Pro* (Obr. 33) za téměř desetinovou cenu, která je stále vysoká pro běžné domácí použití. Mnohdy je komentována jako dostupná desktopová tiskárna pro průmyslové využití. Nabízí tiskový prostor $294 \times 192 \times 149$ mm s velmi jemným rozlišením vrstvy 16 až 28 mikronů a s výběrem tisku z 8 různých materiálů. Disponuje dvěma podavači, kdy lze tisknout hlavní a zároveň i podpurný materiál, který je netoxický a odpлавuje se v dodávané stanici. Nachází se někde mezi typickou FDM a přesnou SLA tiskárnou. [39]



Obr. 33) Tiskárna Stratasys Objet30 Pro

3 MATERIÁLY



Volba materiálu ovlivňuje celkové vlastnosti výtisku. Pro FDM tiskárny se typicky využívá termoplastu v podobě drátu namotaného na cívce, zvaný filament. Tento drát je zaveden do podavače tiskárny a je postupně odmotáván z cívky. Materiály se především liší v obtížnosti tisku, pevnosti a vizuální kvalitě povrchu. Na trhu se jich vyskytuje již v řádech desítek či stovek různých druhů, v této kapitole byly vybrány ty podstatné a nejpoužívanější.

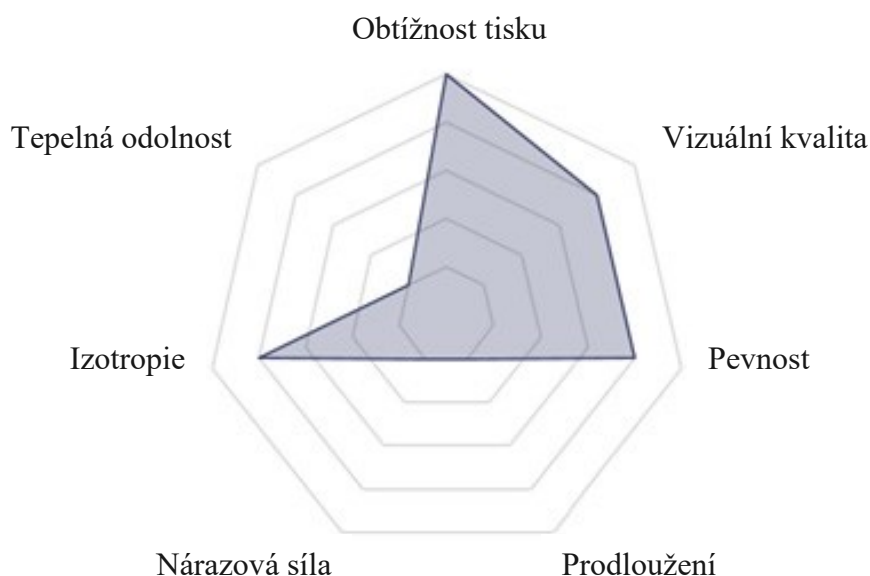
Dle různých testů a zkoušek během několika let byly společností *3D Matter* sestaveny a zveřejněny přehledné grafy zobrazující jednotlivé vlastnosti různých materiálů a nabízí možnost mezi sebou tyto materiály porovnávat. Každá tato vlastnost byla ohodnocena dle navrženého bodového systému posuzující následující [20]

- **Obtížnost tisku** – přilnavost materiálu k podložce, rychlost tisku, zmetkovitost, přesnost dávkování materiálu, obtížnost podávání materiálu do trysky apod.
- **Vizuální kvalita** – celkový vzhled vytištěné součásti bez post-processingu
- **Pevnost** – maximální pevnost namáhaného vzorku, než došlo k jeho lomu
- **Prodloužení** – maximální natažení namáhaného vzorku, než došlo k jeho lomu
- **Nárazová síla** – energie potřebná k přelomení vzorku
- **Izotropie** – vlastnosti součásti jsou ve všech směrech stejné, posuzováno dle přilnavosti jednotlivých tištěných vrstev na sebe
- **Tepelná odolnost** – maximální teplota, než se začne díl deformovat

3.1 PLA

Nejrozšířenějším a materiálem je v dnešní době PLA (*polylactic acid; polymléčná kyselina*). Vyrábí se z kukuřičného škrobu a je tak biologicky plně rozložitelný, při tavení ani není cítit nepříjemný zápach plastu. Oblíbený je zejména kvůli nízké pořizovací ceně a velmi snadnému tisku, zejména pro začátečníky neovládající technologii 3D tisku. Disponuje skvělou přilnavostí k tiskové podložce a není tolik náchylný k deformacím vlivem ochlazování. Nevýhodou je nízká odolnost vůči teplotám, PLA typicky měkne už při teplotách kolem 50 °C čímž se stává v některých aplikacích nevyužitelný. Vyrábí se mnoha barevných kombinacích, a to včetně variant kompozitních materiálů, tedy kdy je smíchán s jinou substancí a plast dostává nové vlastnosti a vzhled například dřeva či kovu. [18][19]

Technologie	FDM, SLA, SLS
Důležité vlastnosti	Rozložitelný, vhodný do potravinářství, bez zápachu při tavení, malá deformace při chlazení
Aplikace	Prototypy, domácí projekty pro kutily, funkční díly
Pořizovací cena	Nízká
Teplota tisku	180-230 °C
Teplota podložky	20-60 °C
Hustota	1250 kg/m ³



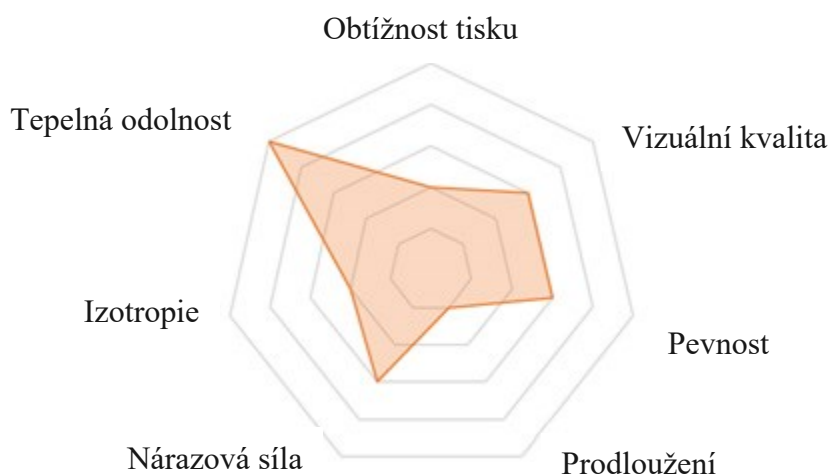
Obr. 34) Hodnocení PLA

3.2 ABS

Jedná se rovněž o oblíbený termoplast (*akrylonitrilbutadienstyren*), především kvůli jeho tuhosti a odolnosti proti mechanickému poškození, a i některým chemickým látkám. Je rozpustitelný v acetonu, což je často využíváno pro vyhlazování povrchu pro zvýšení vizuální kvality. Při tisku vzniká nepříjemný zápach, kdy dochází při tavení k vytváření potenciálně nebezpečných látek, je tak vhodné tiskárnu odvětrávat. Další nevýhodou je jeho vysoká citlivost na změny teplot zejména při průběhu ochlazování a často tak dochází k nechtěnému kroucení tištěného dílu. Pro operaci s tímto materiálem je tak zapotřebí již jakási základní znalost 3D tisku, a především kvalitní tisková podložka s možností ohřevu až kolem 110°C. Rovněž je vyráběn jako kompozit umožňující tisk lékařských prototypů, přípravky pro montáž elektronických součástí či díly svítící určitou ve tmě po jeho předchozím nasvícení.

Alternativou k ABS byl vytvořen termoplast zvaný ASA, který kombinuje veškeré výhodné vlastnosti, a navíc se vyznačuje vysokou odolností vůči povětrnostním podmínkám a UV záření. Také samotný tisk je mnohem snadnější. [18][19]

Technologie	FDM, SLA, Binder Jetting
Důležité vlastnosti	Lehký, mechanicky i tepelně odolný, možnost jednoduché postprodukce leptáním v aerosolu acetonu, snadné lepení
Aplikace	Prototypy, domácí projekty, funkční díly
Pořizovací cena	Nízká
Teplota tisku	220-250 °C
Teplota podložky	90-120 °C
Hustota	1050 kg/m ³

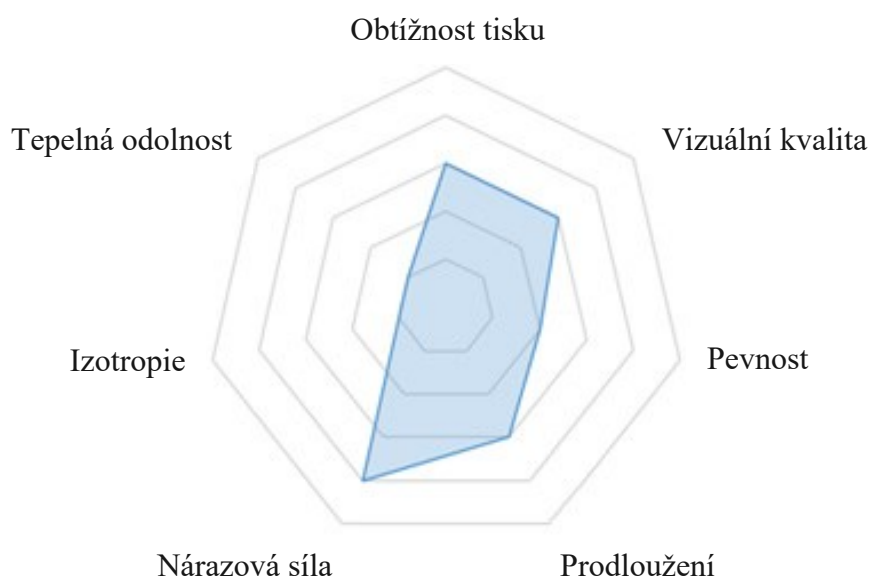


Obr. 35) Hodnocení ABS

3.3 NYLON

Velice odolný materiál vůči mechanickému poškození a především rázům, hlavně díky skvělé adhezi jednotlivých tištěných vrstev k sobě. Je tak využíván pro tisk namáhaných součástí a funkčních dílů. Nevýhodou je jeho schopnost absorbovat vodu, respektive citlivost na vlhkost, kdy již při pouhém skladování na vzduchu silně navlhá a při tisku s takto nevysušeným materiálem jsou vytvářeny v díle bubliny. Je tak doporučováno skladování ve speciálních sušičkách, tedy uzavřené nádoby s aktivním odvlhčováním, či vakuových vacích. [18][19]

Technologie	FDM, SLS
Důležité vlastnosti	Odolný s vysokou pevností v tahu, lesklý povrch, tenké tvary flexibilní, všestranné využití
Aplikace	Namáhané díly, lékařský průmysl, prototypy
Pořizovací cena	Střední
Teplota tisku	230-270 °C
Teplota podložky	90-120 °C
Hustota	1 100 kg/m ³



Obr. 36) Hodnocení Nylon

3.4 PETG

Vychází ze známého a nejvíce rozšířeného plastu po celém světě ve formě nápojových lahví a různých obalů. Pro aditivní výrobu byl tento plast modifikován přidáním glykolu, což má za následek vysokou odolnost proti rozpouštědlům, odolnost proti rázům či transparentnost a také podstatně zjednodušuje tisk, než je tomu u základní formy termoplastu. Je jakýmsi kompromisem mezi PLA a ABS, kdy nabízí relativně snadný tisk, avšak je nutné najít správné nastavení tiskárny, a pro většinu aplikací má i dostatečnou odolnost. Nabízí mimo jiné i flexibilitu či zdravotní nezávadnost pro využití v potravinářském průmyslu. [18][19]

Technologie	FDM
Důležité vlastnosti	
Aplikace	Namáhané díly, potravinářský průmysl, venkovní díly odolné povětrnostním vlivům
Pořizovací cena	Střední
Teplota tisku	210-250 °C
Teplota podložky	40-60 °C
Hustota	1350 kg/m ³



Obr. 37) Hodnocení PETG

3.5 TPU

Termoplastický uretan, občas nazýván jako termoplastický kaučuk, je řazen mezi elastomery, tedy vysoce pružný materiál. Vlivem vnější síly je možné vytvořené díly významně deformovat a následně jim navrátit původní tvar. Zároveň je houževnatý, vyznačuje se skvělou adhezí vrstev a odolností vůči olejům a mazivům. Naopak se nedoporučuje vystavovat jej kyselému prostředí. Právě kvůli flexibilitě je velice obtížné lepení a jakýkoliv post-processing vytištěných součástí. Navržené díly by neměly obsahovat příliš detailů, jelikož je s tímto materiálem obtížný tisk. Zejména je nutná co nejmenší vzdálenost od podavače k tiskové hlavě, jelikož i samotná struna je ohebná a dochází ke špatnému podávání materiálu zvláště u bowdenových extruderů. [18][19]

Technologie	FDM, SLA
Důležité vlastnosti	Vysoce ohebný, elastický a silný materiál, přilnavost k většině povrchů
Aplikace	Automobilní průmysl, kryty na elektroniku, zdravotnictví
Pořizovací cena	Vysoká
Teplota tisku	240-270 °C
Teplota podložky	40-60 °C
Hustota	1250 kg/m ³



Obr. 38) Hodnocení TPU

3.6 PRYSKYŘICE

Výše popsané materiály se především využívají při tisku metodou materiálové extruze. U metody SLA je využita pryskyřice k vytvrzování UV světlem. Obecně jsou výtisky hladké, detailní a s vysokou pevností, naopak ale křehké či nepoužitelné do venkovního prostředí kvůli citlivosti na UV záření. Vyrábí se s mnoha aditivy a dá se tak rozdělit na několik typických variant. [21][22]

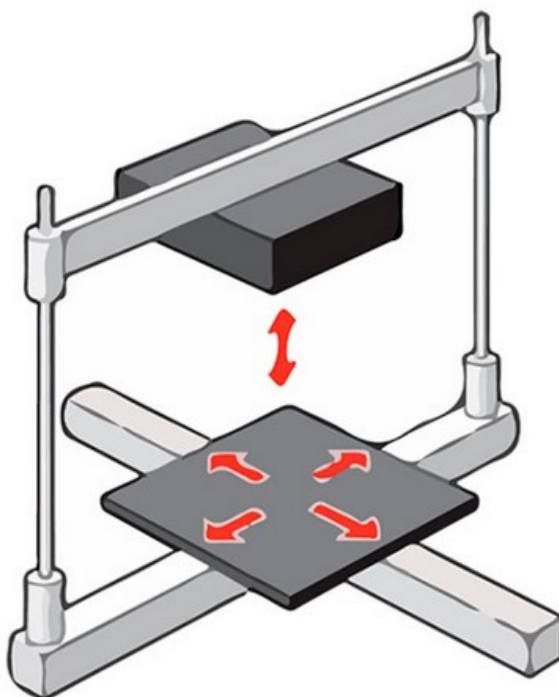
- Standartní
 - Základní (*Standard resin*) – neutrální barevnost pro prototypy a následné barvení nátěry
 - Čirá (*Clear resin*) – průsvitné výtisky
 - Barevná (*Color resin*) – jednotně barevné modely
- Konstrukční
 - Šedá (*Grey resin*) – pro koncepční modelování prototypů
 - Pevná (*Rigid resin*) – vyztužení sklem, lesklý povrch a vysoká odolnost
 - Tvrdá (*Tough resin*) – simuluje ABS
 - Odolná (*Durable resin*) – simuluje polypropylen, využití u nárazuvzdorných krytů či kloubů
 - Pružná (*Flexible resin*) – simuluje 80A gumu
 - Vysokoteplotní (*Heat resistant resin*) – odolnost až 289 °C při nízkém zatížení
- Šperkařské
 - odlévací pryskyřice pro zachycení přesných detailů
- Dentální
 - biokompatibilní pryskyřice pro modely korunek a různých chirurgických přípravků
- Keramická
 - vypálením vznikají modely pocitově připomínající keramiku

4 KONSTRUKCE

Následující kapitola se zabývá vlastním řešením dané problematiky. Postupně je navržena mechanická část tiskárny spočívající v návrhu pohybového mechanismu a hlavního nosného rámu. Dále elektronická část, kde jsou vybrány veškeré komponenty pro řídicí systém a ohřev a vhodná tisková hlava. Následně je konfigurován dostupný open source řídicí firmware pro zvolený návrh.

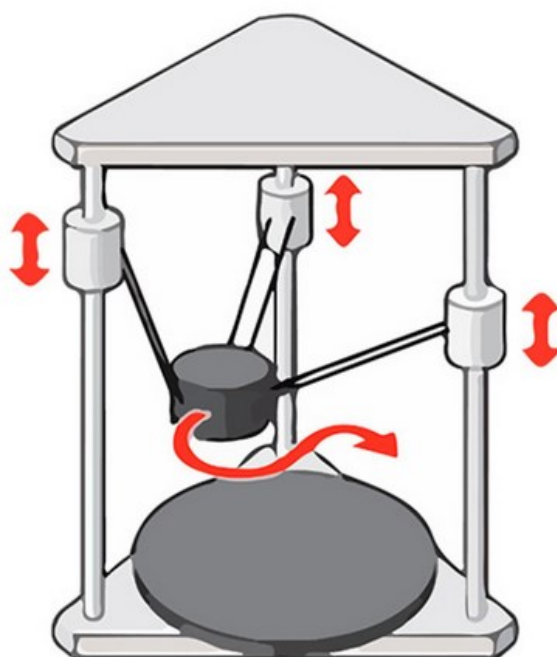
4.1 MECHANICKÁ ČÁST TISKÁRNY

Nejprve je nutné definovat typ pohybového mechanismu. Tiskárna bude fungovat metodou materiálové extruze, tedy FDM, která nabízí několik variant těchto pohybových mechanismů. Vybíral jsem mezi Kartézským mechanismem, již zaběhlým systémem především u tiskáren Prusa Research, mechanismem Delta a mechanismem CoreXY. Všechny tři možnosti využívají kartézský souřadný systém pro definici bodu či trajektorie v prostoru pomocí souřadnic X, Y a Z. Pohybový mechanismus tiskárny má tedy tři stupně volnosti a existuje několik variant řešení. Klasický Kartézský mechanismus (Obr. 39) jakožto dnes již nejpoužívanějším komplexem u běžně dostupných komerčních 3D tiskáren, kdy nejčastěji se v jednom z horizontálních směrů pohybuje tisková podložka a ve zbylých dvou směrech zastává pohyb tisková hlava. Toto řešení je velice jednoduché, není nákladné a tiskárna je zároveň snadná na údržbu. Velkou nevýhodou je pohybující se tisková podložka v rovině XY a dochází tak k neustálému pohybu právě vytvářeného dílu, což může způsobit problémy s tiskem především u rozměrnějších součástí. Aby bylo chybám zamezeno, je nastavena horní hranice pro maximální zrychlení jednotlivých krokových motorů, ovládajících pohyb, a je omezena celková rychlost tisku.



Obr. 39) Kartézský systém u FDM tiskáren

Dalším řešením vycházejícího z kartézského souřadného systému je tzv. systém Delta, avšak namísto lineárního pohybu, je konstrukce složena ze tří závěsných ramen, kdy každé z nich je samostatným rovnoběžníkem (Obr. 40). K pohybu v prostoru dochází změnou úhlu právě v těchto rovnoběžnících. Ramena jsou zavěšena na pevné platformě, kde se také nachází veškerá mechanika řídící pohyb. Tím je tisková hlava velice lehká, což snižuje moment setrvačnosti a zvyšuje se přesnost tisku. Mechanismus vychází z původního návrhu průmyslových robotů Delta, pouze byl vyměněn efektor za tiskovou hlavu. Tisková podložka je nejčastěji kruhového tvaru a je uchycena fixně. Největší výhodou těchto tiskáren je schopnost tisknout velmi vysoké objekty. Zvolením délky závěsných ramen je tak možné dosáhnout jakékoliv výšky tiskárny. Obvykle je delta mechanismem dosaženo vyšší kvality povrchu než u kartézského systému.



Obr. 40) Systém Delta u FDM tiskáren

Třetím možným řešením je mechanismus CoreXY. Vychází také z kartézského souřadného systému, tisková hlava je uložena v portálu a pohybuje se v horizontální rovině podél os X a Y. Tento portál je buďto pevně uložen v horní části rámu a tisková podložka má umožněn pohyb ve svislé ose, nebo je podložka zafixována a pohybuje se portál. Velkou výhodou je možnost tisku daleko vyššími rychlostmi.

U pohyblivého portálu je problémem vysoká hmotnost, kterou se pohybuje. Zdvih portálu je mnohem komplexnější operace než zdvih tiskové podložky. Zároveň je potřeba mít tiskovou podložku rovnoběžnou s horizontální rovinou tiskové hlavy, respektive trysky, což je z pohledu návrhu také daleko jednodušší.

Další řešení bude vycházet ze systému CoreXY s pevně uloženým portálem a pohyblivou tiskovou podložkou ve svislém směru, bude tedy celý mechanismus popsán podrobněji.

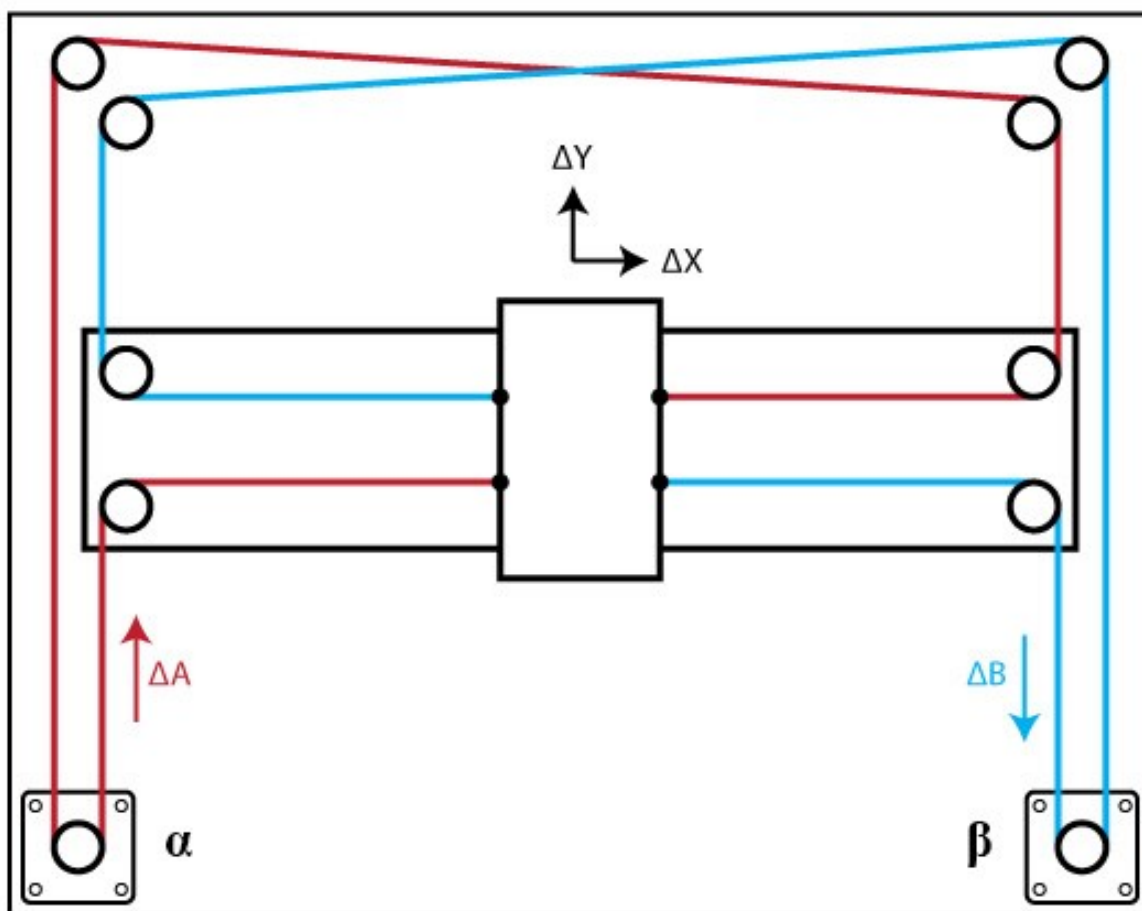
4.1.1 Návrh pohybového mechanismu

Dle schématu na Obr. 41 je konstrukce portálu symetrická, k pohybu samotné tiskové hlavy je zapotřebí dvou krokových motorů, označených α a β , uložených také symetricky. Napnutím dvou řemenů systémem kladek a řemenic dochází k pohybu tiskové hlavy, který vyjadřují následující rovnice vycházející z Obr. 41.

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B) \quad (1)$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B) \quad (2)$$

Velkou výhodou je nízká hmota, kterou je pohybováno, jelikož jsou motory uloženy napevno na konstrukci portálu a veškeré propojení je zprostředkováno řemeny. Lze tak dosáhnout mnohem vyšší rychlosti tisku než u klasického Kartézského systém. Právě řemeny a systém několika kladek je zároveň i nevýhodou, jelikož při akceleraci motorů dochází k natahování těchto řemenů a chovají se prakticky jako pružiny. S jejich přibývajícím délkou pak narůstá i protažení, což může mít vliv na kvalitu tisku. Použitím dostatečně širokých řemenů se lze vyhnout, aby byly tyto změny délek, jakkoliv promítnuty v tištěném díle.

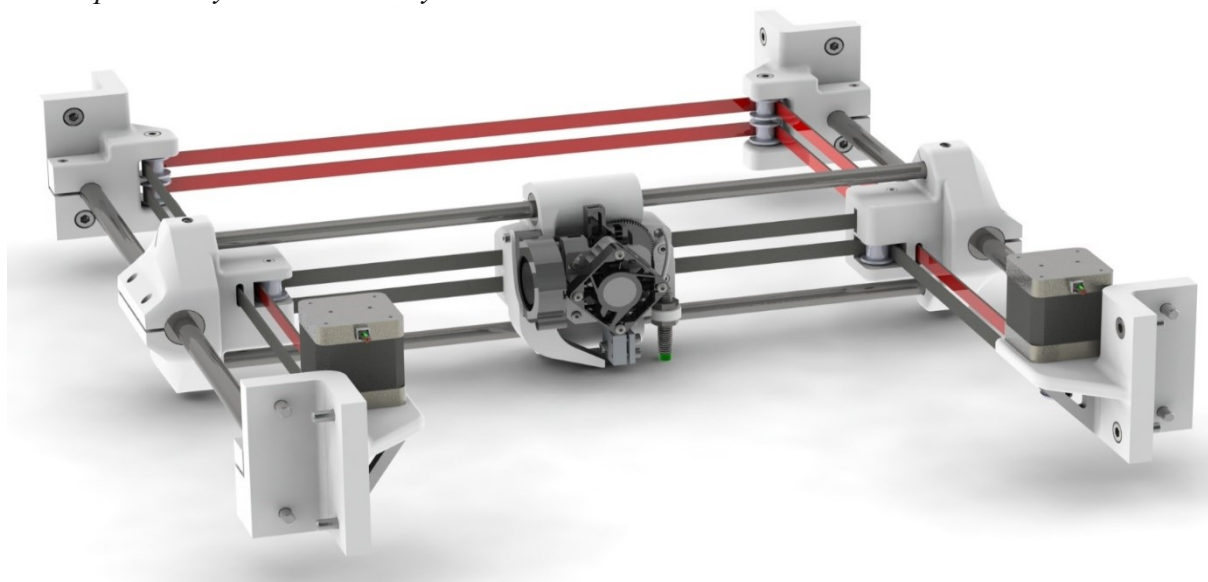


Obr. 41) Schéma CoreXY mechanismu

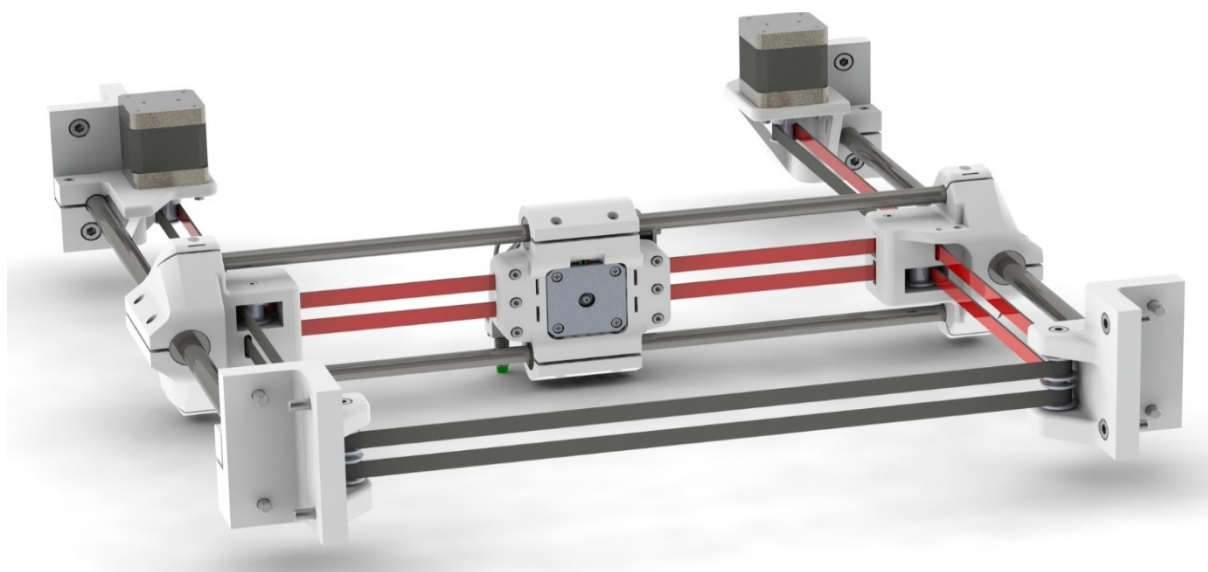
Pohyb tiskové hlavy v osách X a Y je zajištěn vodícími tyčemi a lineárními ložisky. Dva řemeny stejné délky, vedoucí z každého motoru jeden, jsou uloženy kolineárně nad sebou. Pro funkčnost pohybového mechanismu využívá každý řemen 4 kladky, uloženy v konstrukci portálu, které musí být přesné, aby byla zachována rovnoběžnost řemenů a vodících tyčí a nedocházelo k naklápění kladek podél osy pod jejich zatížením.

Na Obr. 42 a 43 je zobrazen renderovaný model navržené konstrukce portálu. Červeně je zobrazena vnitřní, ozubená, část řemenu, natažená přes ozubené kladky. Černá, hladká, část řemenu je natažena přes hladké napínací kladky. Tisková hlava má umožněn pohyb v ose X na dvou lineárních tyčích o průměru 10 mm osazenými každá jedním prodlouženým lineárním ložiskem LM10LUU, osa tiskové hlavy se pak pohybuje ve směru Y na dvou lineárních tyčích o průměru 12 mm osazenými dvěma lineárními ložisky LM12UU na každé straně.

Pozn.: parametry ložisek uvedeny na Obr. 46



Obr. 42) Konstrukce portálu při pohledu zepředu



Obr. 43) Konstrukce portálu při pohledu zezadu

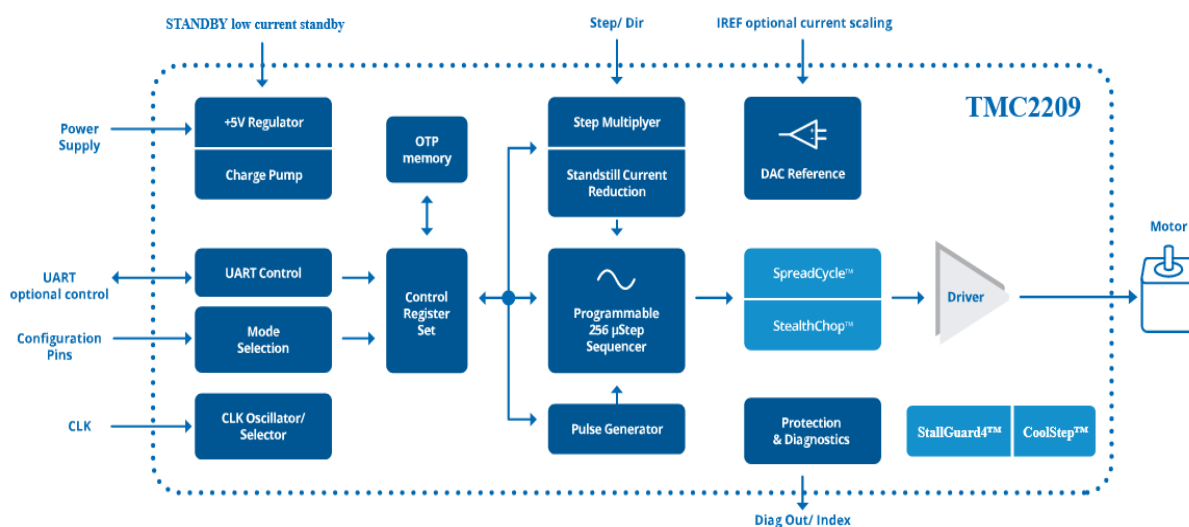
Jsou použity dva pryžové synchronizační řemeny Gates PowerGrip typu 2GT s jádrem ze skelných vláken s a nylonovým vnějším povrchem. Šířka je 9 mm, rozteč zubů 2 mm a celková délka každého řemenu je 1640 mm. Kladky jsou použity stejného typu, vnitřní průměr otvoru je 5 mm a v případě ozubených je použit typ s 20 zuby.

Mechanismus pohání dva krokové motory s přírubou NEMA 17. Následující výpočty definují teoreticky potřebný kroutící moment motorů.

Hmotnost kompletní pohyblivé tiskové jednotky $m_{hlava} = 0,5$ kg.

Krokový motor řídí budič *Trinamic TMC2209* (Obr. 44). Přináší tichý chod a vysokou účinnost rychlou regulací proudu, který může být díky integrovaným MOSFETům až 2 ampéry. Firma Trinamic má patentovány následující klíčové módy

- *StealthChop2*TM - vysoce přesný algoritmus pro bezhlučný a hladký pohyb a zastavení motoru při nízkých rychlostech
- *SpreadCycle*TM - podobný, jako předchozí funkce, tento mód je agresivnější vhodný pro dynamický pohyb při vyšších rychlostech
- *MicroPlyer*TM - interpolace mikrokrokování pro získání až 256 mezikroků
- *StallGuard4*TM - kontinuální měření zátěže motoru
- *CoolStep*TM - funkce přizpůsobující proud pro nejlepší účinnost a nejmenší zahřívání



Obr. 44) Blokový diagram budiče TMC2209

Budič po prvním spuštění a rozpořhybování motoru automaticky optimalizuje nastavení. Chod motoru je pak plynulý a slyšitelný je pouze hluk vytvářející pohyb ložisek. Správným nastavením firmware je možné mezi dvěma řídicími módy *StealthChop2* a *SpreadCycle* přepínat podle aktuální potřebné rychlosti tiskárny a je tak zvýšena účinnost motoru než při použití klasického mikrokrokování. Funkce *StallGuard4* umožňuje detekci kolizí, díky čemu lze uvádět mechanismus řízený krokovým motorem do domovské pozice bez použití jakéhokoliv koncového snímače.

Typicky má motor úhel kroku $1,8^\circ$, v přepočtu se jedná o 200 kroků na jednu otáčku. Funkce mikrokrokování tyto základní kroky rozděluje do dalších až 256 poloh, čímž lze teoreticky získat až 51 200 kroků na otáčku. Pohyb je pak mnohem plynulejší a snižuje se i hluk způsobovaný jinak velkými změnami proudu. Naopak se snižuje i točivý moment, jelikož se motor snaží z této mezi polohy dostat do nejbližšího celého kroku. Tento úbytek lze popsat následující rovnicí

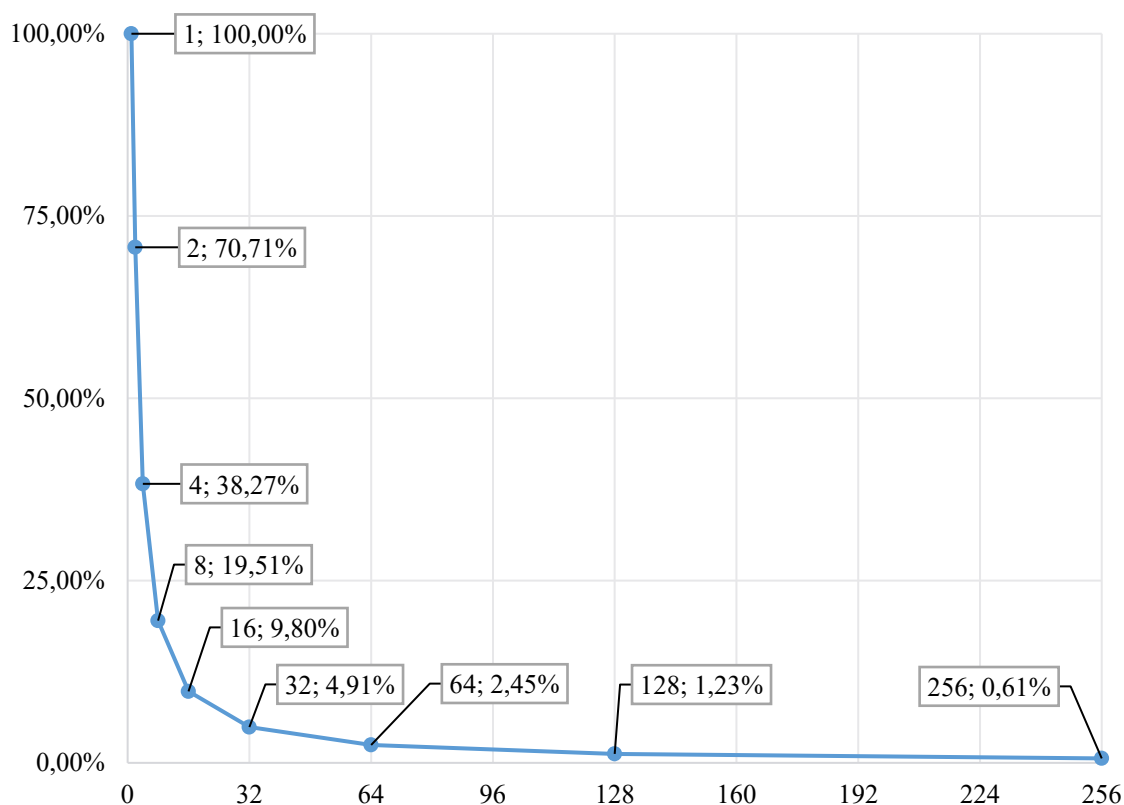
$$T_N = T_{full} \cdot \sin\left(\frac{90}{n}\right) \quad (3)$$

kde T_N je točivý moment motoru při použití mikrokrokování [Nm]

T_{full} je točivý moment motoru dle výrobce při celokroku

n je počet mikrokroků na jeden celý krok

Velikost točivého momentu vztaženého vůči celému kroku je viditelný na grafu na Obr. 45. Využitím kvalitních ovladačů je možné vyprodukovat lepší průběh točivého momentu, jelikož využívají při mikrokrokování interpolace a optimalizují tuto funkci s ohledem na potřebnou zátěž a rychlost. V praxi motor nejprve překonává odpory snažící se jej vychýlit z mezi polohy a je-li požadovaný kroučící moment vyšší, než je motor schopen momentálně vyvinout, probíhá nejprve několik mikrokroků, které tyto odpory postupně snižují, jelikož se motor vrací do celé polohy. Avšak motor má v tuto chvíli zároveň snížen i přídržný moment, a zatěžující síla jej může nekontrolovatelně strhnout až do polohy odpovídající celému kroku. [23]



Obr. 45) Úbytek točivého momentu krokového motoru využitím mikrokrokování

Zvolen je krokový motor **OMC 17HS19-2004S1** s následujícími parametry

- Typ motoru: Bipolární
- Úhel kroku: $1,8^\circ$
- Kroutící moment: $59 \text{ Ncm} = 0,59 \text{ Nm}$
- Jmenovitý proud: $2,0 \text{ A}$
- Napětí: $2,8 \text{ V}$
- Fázový odpor: $1,4 \Omega$
- Indukčnost: $3,0 \text{ mH} \pm 20 \%$
- Moment setrvačnosti rotoru: $82 \text{ gcm}^2 = 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$

Aby nedocházelo k přehřívání motoru během provozu, výrobcem se doporučuje využívat motor maximálně při 85 % jmenovitého proudu, účinnost je tedy snížena na $\mu_1 = 0,85$. Za předpokladu, že bude využito mikrokrokování s 16 mezi polohami, točivý moment motoru se může dle grafu na Obr. 45 snížit až na $\mu_2 = 0,098$. Dostupný kroutící moment je pak

$$T_{REAL} = T_{full} \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 = 59 \cdot 0,85 \cdot 0,098 = 4,92 \text{ Ncm} = 0,00492 \text{ Nm} \quad (4)$$

Koncová hřídel motoru je osazena řemenicí s 20 zuby. Efektivní poloměr řemenice je potom

$$r_{P1} = \frac{20 \cdot 2}{2\pi} = 6,37 \text{ mm} = 0,637 \text{ cm} \quad (5)$$

Odtud síla napínající řemen

$$F_1 = \frac{T_{REAL}}{r_{P1}} = \frac{4,92}{0,637} = 7,72 \text{ N} \quad (6)$$

Jelikož jsou k pohybu použity dva motory, i napínací síla je dvojnásobná. K celkové hmotnosti je nutné ještě připočíst moment setrvačnosti rotoru krokového motoru, převod na ekvivalentní zatížení vychází z rovnice

$$m_{mi} = \frac{J_m}{r_{P1}^2} = \frac{82}{0,637^2} = 202,1 \text{ g} = 0,2021 \text{ kg} \quad (7)$$

Celková ekvivalentní hmotnost je pak

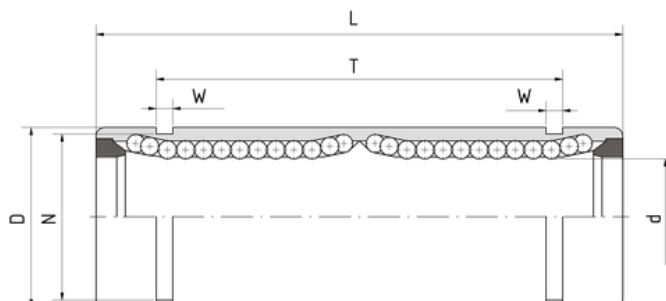
$$m_{ce} = m_{hlava} + m_{mi} = 500 + 202,1 = 702,1 \text{ g} \doteq 0,7 \text{ kg} \quad (8)$$

Dostupné zrychlení použitím zvolených motorů je pak

$$a = \frac{2 \cdot F}{m_{ce}} = \frac{2 \cdot 7,72}{0,7} = 22,06 \text{ m/s}^2 = 22\,060 \text{ mm/s}^2 \quad (9)$$

4.1.2 Návrh zdvihacího mechanismu

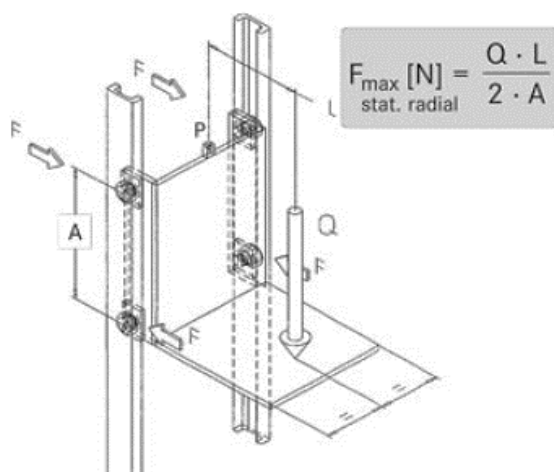
Výše popsaným systémem je zprostředkován pohyb pouze v osách X a Y, pro osu Z jsem využil zdvihací mechanismus (Obr. 48) založený na dvou trapézových šroubech, které ovládají také dva krokové motory. Pohyb je prováděn na dvou lineárních tyčích o průměru 12 mm osazena každá jedním prodlouženým lineárním ložiskem LM12LUU.



Rozměry a tolerance [mm]										Zatížení [N]	
Typ	d		D	B	W	L		N	Hmotnost	dynamické	statické
LM10LUU	10	0 -0,01	19	44	1,3	55	0 -0,2	18	62 g	588	1100
LM12UU	12	0 -0,01	21	46	1,3	30	0 -0,2	20	31,5 g	510	784
LM12LUU	12	0 -0,01	21	46	1,3	57	0 -0,2	20	80 g	813	1570

Obr. 46) Parametry lineárních ložisek

Výpočet zatížení je proveden dle výpočtového modelu pro ložiskové síly od firmy Winkel (Obr. 47). Schéma lze použít pro zjednodušený výpočet sil u lineárních ložisek.



Obr. 47) Výpočet ložiskových sil u vozíku

kde Q je zatížení vozíku [N]

L je vzdálenost působíště zatížení od závěsného bodu P, voleno 0,211 mm

A je délka prodlouženého lineárního ložiska LM12LUU [mm]

Pro vyjádření síly je nutné nejprve definovat zatížení a vzdálenost působíště.



Obr. 48) Zdvihací systém tiskárny

Rozměry tiskové podložky jsou zvoleny 300×200 mm, zdvih potom 270 mm. Odtud celkový tiskový objem

$$V_{print} = 0,3 \cdot 0,2 \cdot 0,27 = 0,0162 \text{ m}^3 \quad (10)$$

Materiál filamentu pro FDM tiskárny s nejvyšší hustotou $\rho_{PETG} = 1,35 \text{ g/cm}^3$ je PETG, nejvyšší hmotnost výtisku o maximálních dostupných rozměrech a plně výplní je tedy

$$m_{print} = V_{print} \cdot \rho_{PETG} = 0,0162 \cdot 1350 = 21,87 \text{ kg} \quad (11)$$

Nutno podotknout, že je téměř nereálné, že se bude podobný model se zaplněním kompletního dostupného objemu kdy tisknout, reálné výtisky dosahují hmotnosti v řádu stovek gramů, bezpečnost bude tedy mnohonásobně vyšší.

Hlavní částí tiskové podložky je hliníková frézovaná deska o rozměrech $310 \times 210 \times 6$ mm o hustotě $\rho_{ALU} = 2710 \text{ kg/m}^3$, přepočet na hmotnost je pak

$$m_{bed1} = V_{deska} \cdot \rho_{ALU} = 0,31 \cdot 0,21 \cdot 0,006 \cdot 2710 = 1,06 \text{ kg} \quad (12)$$

Deska leží na hliníkovém rámu o hmotnosti $m_{bed2} = 0,3 \text{ kg}$. Na desku jsou pak přichyceny další komponenty jako ventilátor či senzory o celkové hmotnosti $m_{bed3} = 0,2 \text{ kg}$. Přepočet celkového zatížení je pak

$$Q_{full} = (m_{print} + m_{bed1} + m_{bed2} + m_{bed3}) \cdot g$$

$$Q_{full} = (21,87 + 1,06 + 0,3 + 0,2) \cdot 9,81 = 229,85 \text{ N} \quad (13)$$

Zdvihové vozíky budou použity dva, symetricky uložené, síla od zatížení bude na každý vozík poloviční. K zatížení je nutné připočítat hmotnost samotného vozíku $m_{vozik} = 0,15 \text{ kg}$.

$$Q = \frac{Q_{full}}{2} + m_{vozik} \cdot g = \frac{229,85}{2} + 0,15 \cdot 9,81 = 116,40 \text{ N} \quad (14)$$

Působíště zatěžující síly při tomto maximálním zatížení je v těžišti tiskové podložky, vzdáleném od osy šroubu $L = 211$ mm.

Celkové maximální zatížení jednoho lineárního ložiska je

$$F_{lozisko} = \frac{Q \cdot L}{2 \cdot A} = \frac{116,40 \cdot 0,211}{2 \cdot 0,057} = 215,43 \text{ N} \quad (15)$$

Dle tabulky na Obr. 46 má ložisko LM12LUU statickou únosnost 1570 N a dynamickou únosnost $C_{dyn} = 813$ N.

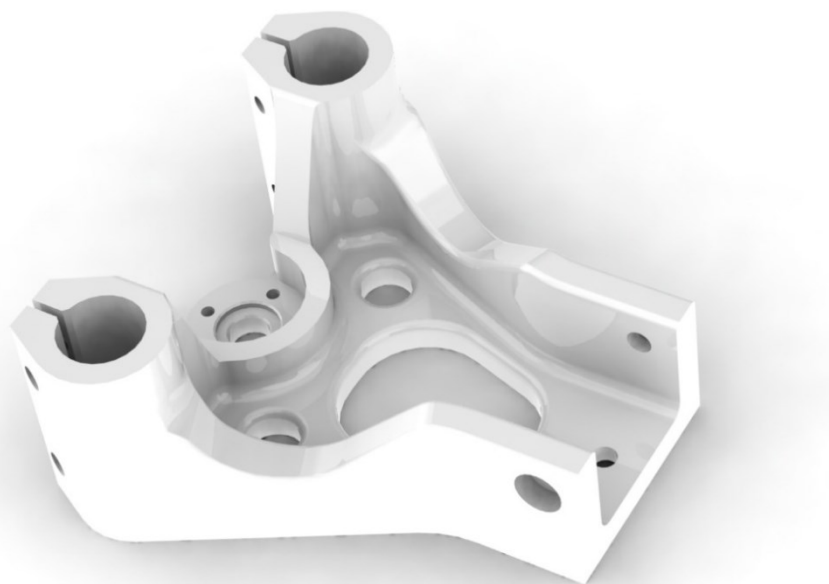
U lineárních vodících ložisek dochází vlivem vysokého zatížení či rázů k lokální deformaci mezi vodící dráhou a kuličkami. Statická únosnost je definována tabulkově a odpovídá statickému zatížení vyvolávající deformaci v nejvíce zatíženém místě o velikosti deseti tisíciny průměru kuličky. Maximální statické zatížení pak nesmí být vyšší, než uváděna únosnost.

V důsledku neustálého opakovaného zatížení vodící dráhy a kuliček ložiska dochází k únavě materiálu. Životnost je definována jako celková pojezdová dráha ložisek, než začne docházet na povrchu kuliček k důlkování (tzv. pittingu). Je stanovena dle normy pro výpočet valivých ložisek jmenovitá dynamická nosnost, což je zatížení, při kterém dosahuje ložisko nominální životnosti 100 000 m, tedy 100 km. [24][25]

Pro pravděpodobnost dožití ložiska 90 % je výpočet životnosti stanoven dle rovnice

$$L_{lozisko} = \left(\frac{C_{dyn}}{F_{lozisko}} \right)^3 \cdot 100\,000 = \left(\frac{813}{215,43} \right)^3 \cdot 100\,000 = 5\,374\,686 \text{ m} \quad (16)$$

Životnost je pouze teoretická, ve skutečnosti bude mnohem vyšší, jelikož ložisko ve zdvihacím mechanismu bude namáháno při běžném provozu daleko menší silou a při této maximální síle je dostupný objem tiskárny kompletně zaplněn, tudíž se nebude dále pohybovat.

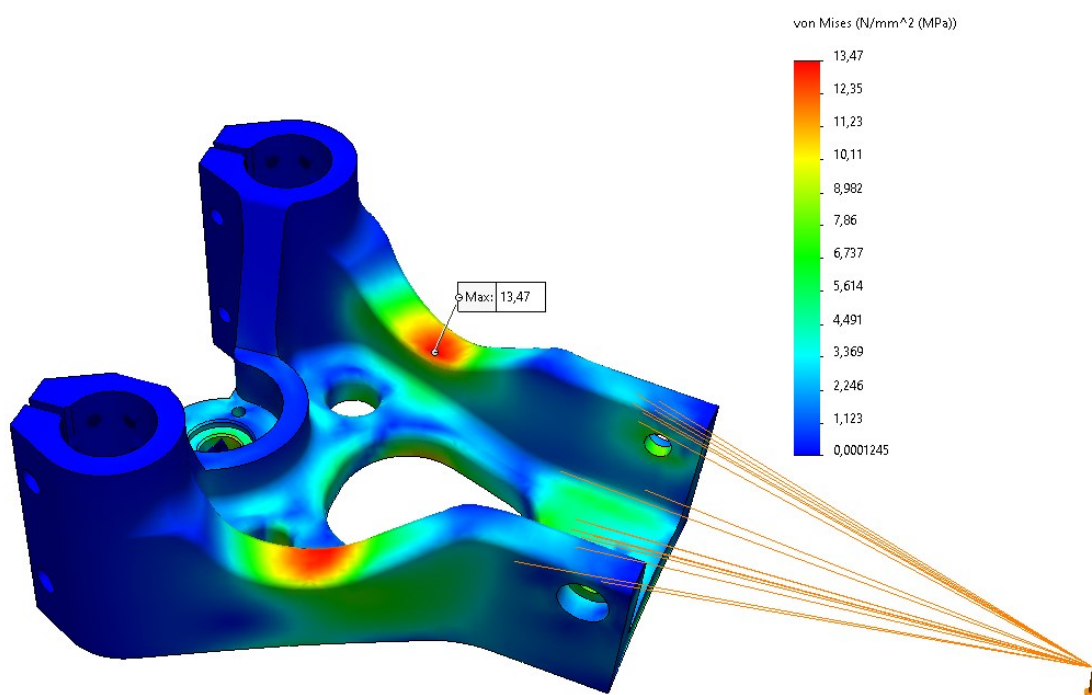


Obr. 49) Renderovaný model zdvihacího vozíku

Namáhanou součástí bude především zdvihací vozík (Obr. 49). V simulačním prostředí systému Solidworks bylo definováno uložení dvou ložisek a vodícího šroubu a celkové zatížení. Metodou konečných prvků byla analyzována maximální deformace a napětí v součásti (Obr. 50). Nejvyšší napětí od zatížení je $\sigma_{max} = 13,47$ MPa v původně předpokládaném místě. Výrobce materiálu uvádí mez pevnosti tiskové struny $R_m = 72$ MPa při 5 mm/min, což lze považovat za ekvivalent meze pevnosti u kovu.

Z maximálního napětí získané simulací lze určit teoretickou bezpečnost

$$k_{vozík_teor} = \frac{R_m}{\sigma_{max}} = \frac{72}{13,47} = 5,35 \quad (17)$$



Obr. 50) MKP analýza zdvihacího vozíku

Nicméně měření výrobce probíhá na plastové struně, která je vstupním produktem při tisku. Samotný tištěný díl, respektive jeho pevnost a odolnost, závisí na mnoha dalších aspektech, jako jsou směr vrstvení vůči zatížení, přilnavost těchto vrstev k sobě, procentuální výplň vnitřní struktury či provozní teplotě.

Byl vytištěn prototyp navrženého modelu vozíku a na zkušebním trhačím stroji bylo simulováno zatížení. Působíště síly od zatížení bylo nastaveno ve vzdálenosti ze simulace modelu metodou MKP. Vozík byl upnut na hliníkový profil přes 3 šrouby simulující vodící tyče a pohybový trapézový šroub. Následně proběhlo měření napětí a ze získaných dat byla sestavena výsledná deformační křivka (Obr. 51).

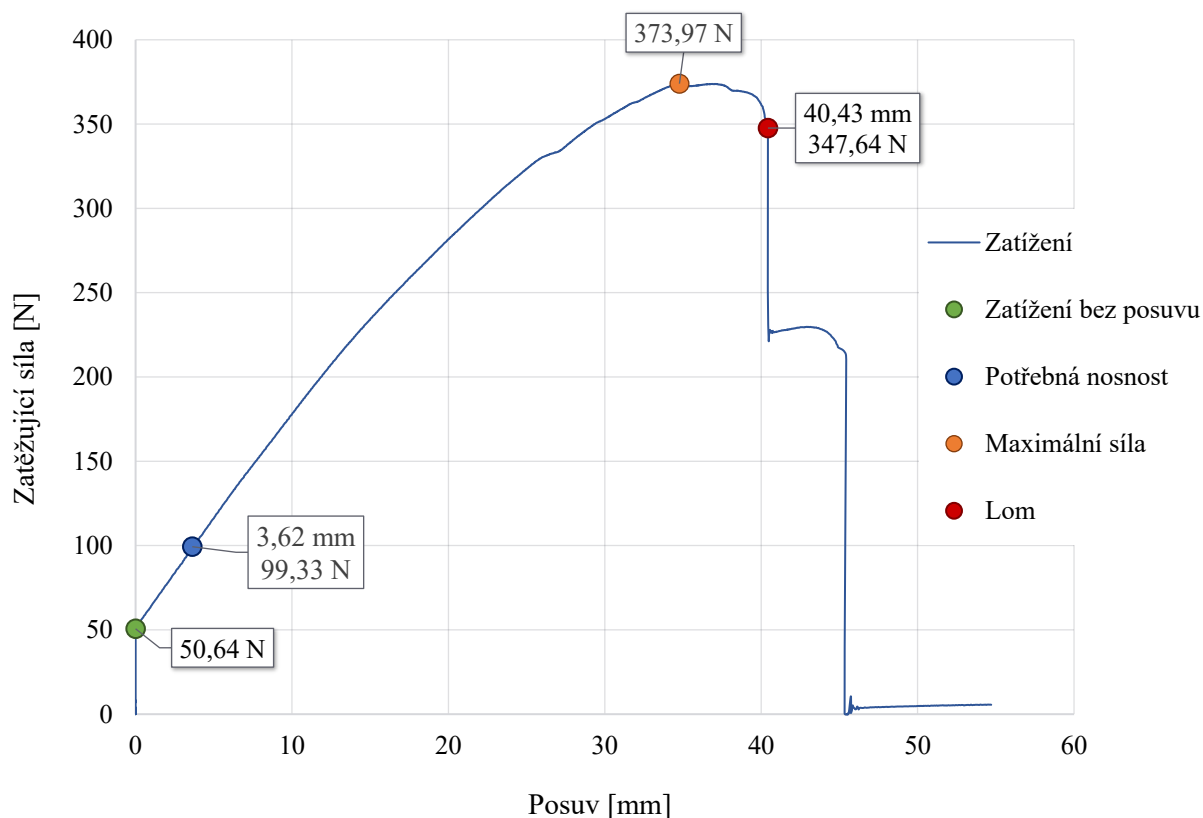
Při namáhání až do síly $F_1 = 50,64 \text{ N}$ nebyl naměřen vůbec žádný posuv, tato síla odpovídá zatížení přibližně 5,16 kg na jeden vozík, pro dva symetricky uložené tedy 10,32 kg celkové hmotnosti. Maximální únosnost vozíku byla $F_2 = 373,97 \text{ N}$, tedy síla odpovídající zatížení 38,12 kg, respektive 76,24 kg pro dva vozíky. Po překonání této maximální síly došlo k částečnému lomu a zanedlouho i k úplnému dolomení.

Při běžném použití tiskárny jsou reálně tištěny díly o hmotnosti v řádech gramů, kdy jedna běžná cívka obsahuje 1 kilogram materiálu. Bezpečně tak zdvihové vozíky unesou zmíněných 10,32 kg bez znatelného průhybu, což po odečtení váhy tiskové podložky představuje 9 plných cívek s materiálem. Maximální potřebné zatížení pak zvládá s průhybem 3,62 mm a bezpečností přibližně 3,8. V případě potřeby je možné tuto únosnost navýšit zmenšením odlehčovacích prvků a zvýšením procentuální výplně.

Z dat získaných experimentálním měřením lze určit přibližně reálnou bezpečnost

$$k_{\text{vozík_real}} = \frac{F_2}{Q} = \frac{373,97}{116,40} = 3,21 \quad (18)$$

Jak je vidět z rozdílu v teoretické a reálné bezpečnosti, vytištěný díl má oproti vstupnímu materiálu v podobě struny bezpečnost menší.



Obr. 51) Deformační křivka získaná experimentálním měřením zatížení

Pohyb ve svislém směru je uskutečněn dvěma trapézovými šrouby $Tr\ 10 \times 3$ s následujícími parametry

$$d = 10\text{ mm}$$

$$d_2 = 8,4\text{ mm}$$

$$d_3 = 6,5\text{ mm}$$

$$P_h = 3\text{ mm}$$

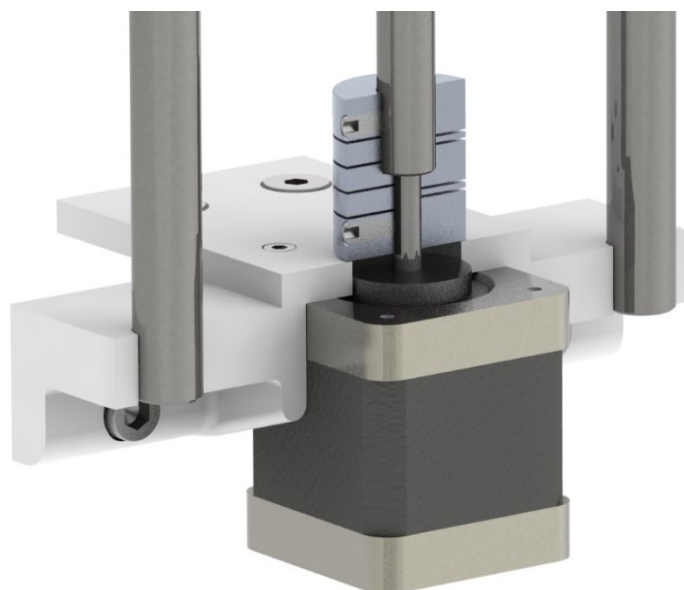
$$L = 490\text{ mm}$$

Na jednom konci šroub prochází jednořadým kuličkovým ložiskem 6000 – 2RS přenášejícím axiální síly a je zajištěn pojistným stavěcím kroužkem DIN 705A o vnitřním průměru 10 mm (Obr. 52).



Obr. 52) Render řezu uchycení horního konce šroubu

Druhý konec je spojen s krokovým motorem hliníkovou pružnou spojkou 5 mm / 10 mm schopnou přenášet krouticí moment až 2 Nm (Obr. 53).



Obr. 53) Render řezu uchycení šroubu s motorem

Pohybový šroub je namáhán smykovým napětím od momentu tření v závitech a tlakovým nebo tahovým napětím od síly působící na šroub. Úhel stoupání závitu šroubu je

$$\gamma = \arctan\left(\frac{P_h}{\pi \cdot d_2}\right) = \arctan\left(\frac{3}{\pi \cdot 8,4}\right) = 6,486^\circ \quad (19)$$

Úhel tření v závitové drážce je

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{f_z}{\cos\frac{\beta}{2}}\right) = \arctan\left(\frac{0,2}{\cos\frac{30}{2}}\right) = 11,7^\circ \quad (20)$$

kde f_z je součinitel tření v závitové drážce, pro bronzovou matici a ocelový šroub volen 0,2

β je vrcholový úhel závitu šroubu, u trapézového je 30°

Platí $\varphi' > \gamma$, šroub je tedy samosvorný. Účinnost šroubu je pak

$$\eta_s = \frac{\tan \gamma}{\tan(\gamma + \varphi')} = \frac{\tan 6,486^\circ}{\tan(6,486^\circ + 11,7^\circ)} = 0,346 = 34,6\% \quad (21)$$

Z mechaniky vodících šroubů je definován potřebný krouticí moment pro zdvih při maximální možné zátěži

$$T_{zdvih} = \frac{Q \cdot d}{2} \cdot \left(\frac{P_h + \pi \cdot d_2 \cdot \eta_s}{\pi \cdot d_2 - \eta_s \cdot P_h}\right) \quad (22)$$

$$T_{zdvih} = \frac{106,88 \cdot 10}{2} \cdot \left(\frac{3 + \pi \cdot 8,4 \cdot 0,346}{\pi \cdot 8,4 - 0,346 \cdot 3}\right) = 216,3 \text{ Nmm} = 2,163 \text{ Nm}$$

a pro spouštění

$$T_{spousteni} = \frac{Q \cdot d}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_2 \cdot \eta_s - P_h}{\pi \cdot d_2 + \eta_s \cdot P_h}\right) \quad (23)$$

$$T_{spousteni} = \frac{106,88 \cdot 10}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 8,4 \cdot 0,346 - 3}{\pi \cdot 8,4 + 0,346 \cdot 3}\right) = 101,1 \text{ Nmm} = 1,011 \text{ Nm}$$

Z rovnice (4) vychází použitelný krouticí moment motoru s využitím funkce mikrokrokování $T_{REAL} = 4,92 \text{ Ncm} = 0,0492 \text{ Nm}$. Zvolený motor pro pohyb v portálu bude možné použít i pro zdvihací mechanismus, jelikož bude vykonávat velmi nízké posuvy při daleko nižších rychlostech a použité ovladače krokových motorů lze nakonfigurovat, aby při vyšším zatížení neuváděly motor do režimu mikrokrokování, čímž lze dosáhnout maximálního točivého momentu krokového motoru

$$T_{MAX} = T_{full} \cdot \mu_1 = 59 \cdot 0,85 = 50,15 \text{ Ncm} = 5,015 \text{ Nm} \quad (24)$$

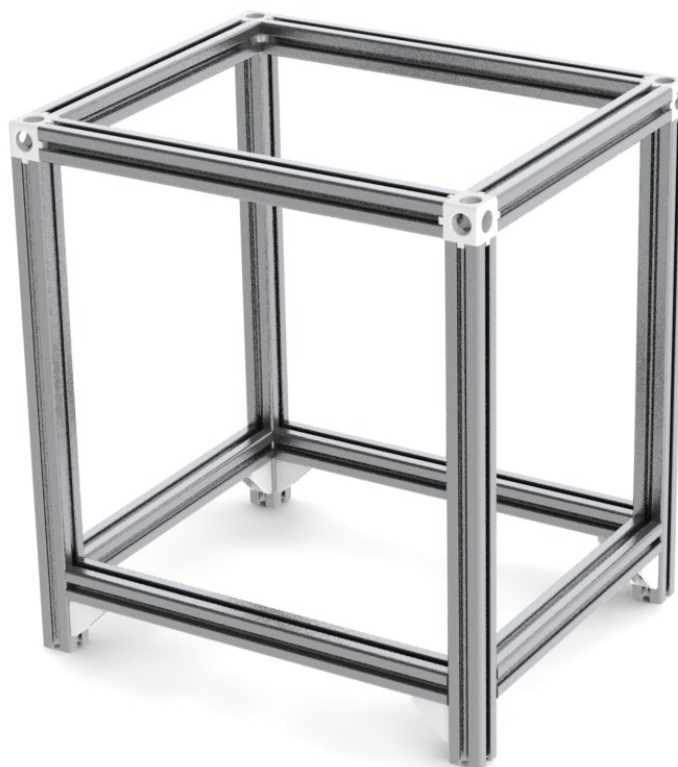
4.1.3 Návrh rámu

Předem bylo zvoleno sestavení hlavního nosného rámu z hliníkových stavebnicových profilů (Obr. 54). Následně byly stanoveny cíle

- Možnost tiskárnu přenášet
- Stabilní a pevná konstrukce
- Kompletní zakrytování s předními dvířky na pantech

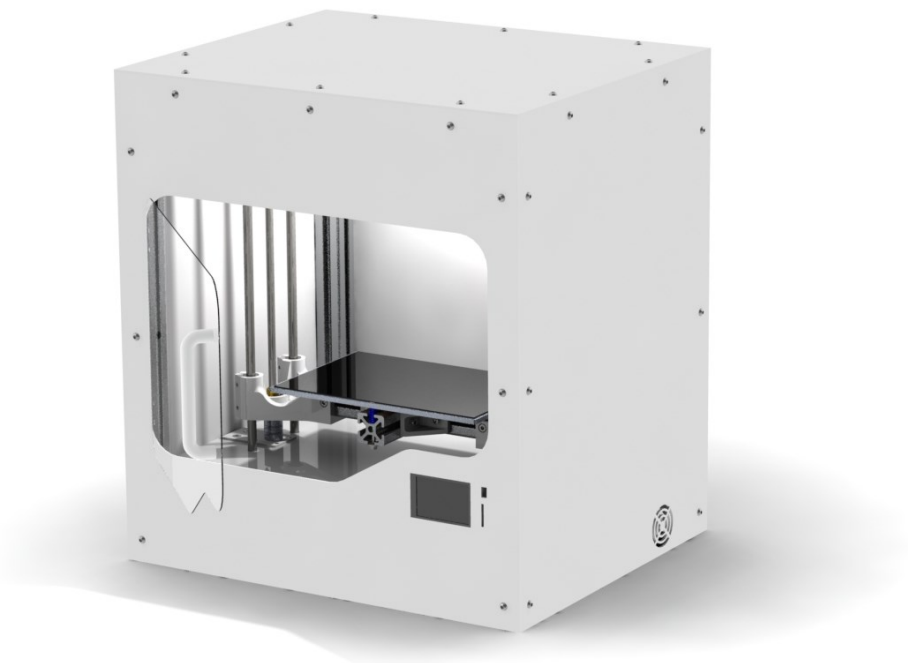
Jedná se o větší tiskárnu, celková hmotnost dle navrženého modelu je 20 kg. Pro dostatečnou stabilitu byla sestavena konstrukce z ITEM profilů o velikosti 4040. Celkem jich je použito 12, vždy čtyři o délkách 400 mm, 500 mm a 600 mm. Rohové spojení je realizováno navrženým tištěným dílem trojcestného rohového spoje a utažením šrouby o velikosti M8. Tyto profily mají drážku o šířce 8 mm a veškeré šroubové spojení podsestav k rámu je prostřednictvím příslušných profilových matic se závitem M6.

Je zamýšlen i tisk s materiálem ABS, který se vyznačuje problémy ve formě smršťování a kroucení výtisků v průběhu chladnutí. Řešením, jak tento jev potlačit, je celkové zakrytování hlavního rámu. To je provedeno akrylátovými deskami o tloušťce 3 mm připevněnými k rámu šrouby s půlkulatou hlavou M6. Zmíněné celkové okrytování (Obr. 55) je jednak designovým prvkem, může ale i zvýšit celkovou tuhost a stabilitu rámu tiskárny. Jelikož nebude zamýšleno časté přenášení, bude tento cíl prozatím potlačen a v případě potřeby jsou v rámu připraveny závity M8 pro přimontování pojezdových koleček.



Obr. 54) Render navržené konstrukce rámu

Deska pokrývající přední stranu tiskárny je upravena na laserové řezačce a je do ní vyřezán otvor pro dvířka z čírého plexiskla, také o tloušťce 3 mm. Uloženy jsou na dvou pantech připevněných k nosnému rámu a pro jednoduché otevírání je ke dvířkům uchycena vytištěná klika. Pro stanovení koncové, zavřené, polohy jsou u dvou okrajů přilepeny neodymové magnety.



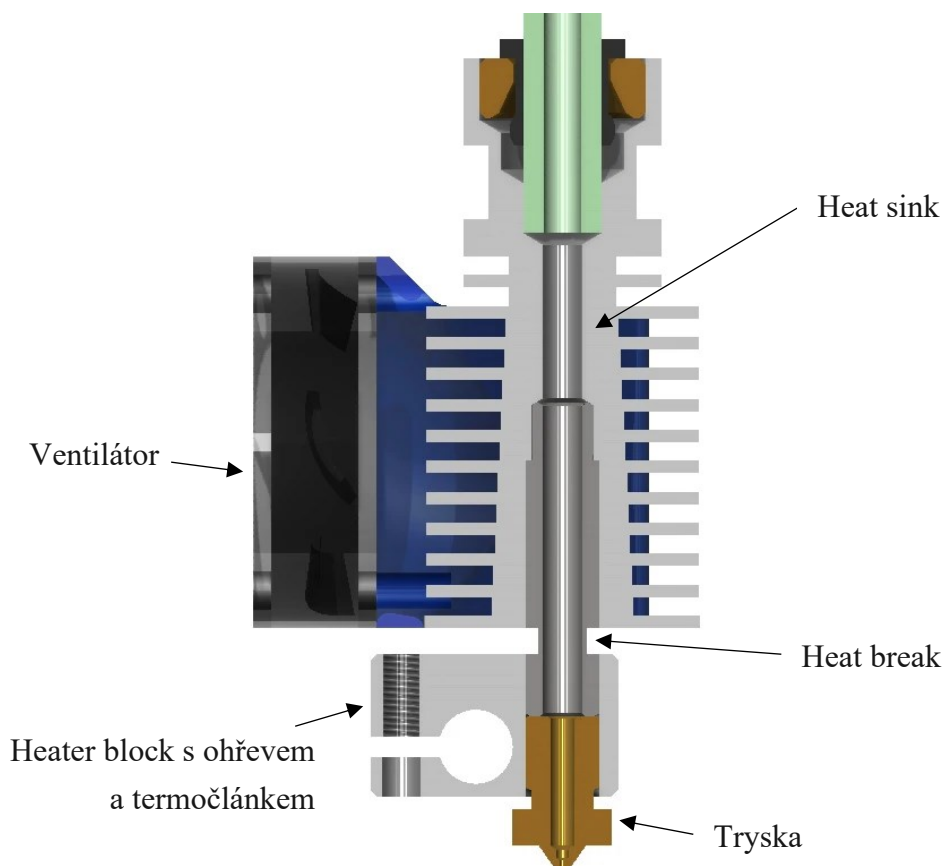
Obr. 55) Render navržené tiskárny s okrytováním

4.2 ELEKTRONICKÁ ČÁST

4.2.1 Hot-End

Nejdůležitější částí FDM tiskárny je tzv. *hot-end* neboli mechanismus tiskové hlavy. Existuje několik výrobců, pro tento projekt jsem vybral hotend V6 od firmy E3D. Ve většině případů se skládá z následujících částí, zobrazeny na Obr. 56.

- *Tryska* – extruduje roztavený filament, drát běžně o průměru 1,75 mm. Ten vstupuje do otvoru v trysce, který je zúžen nejčastěji na 0,4 mm. Finální velikost tohoto otvoru je důležitým parametrem při volbě výšky a tloušťky stěny. Pro dobrou tepelnou vodivost je tryska vyráběna z mosazi, pro některé druhy materiálů je vhodnější například tryska z kalené oceli.
- *Heater block* – hliníkové těleso propojující trysku s termistorem a topným tělesem
- *Ohřev* – nejčastěji keramické těleso zodpovědné za správné ohřívání celého hot-endu.
- *Termistor* – neustálé snímání teploty trysky, u lepších hot-endů se používá termočlánek
- *Heat break* – spojení mezi topným tělesem a chladičem, jedná se o hřídel z nerezové oceli pro nízkou tepelnou vodivost na obou koncích osazenou závitem.
- *Heat sink* – pasivní žebrovaný chladič, běžně je k němu připojeno aktivní chlazení ve formě ventilátoru

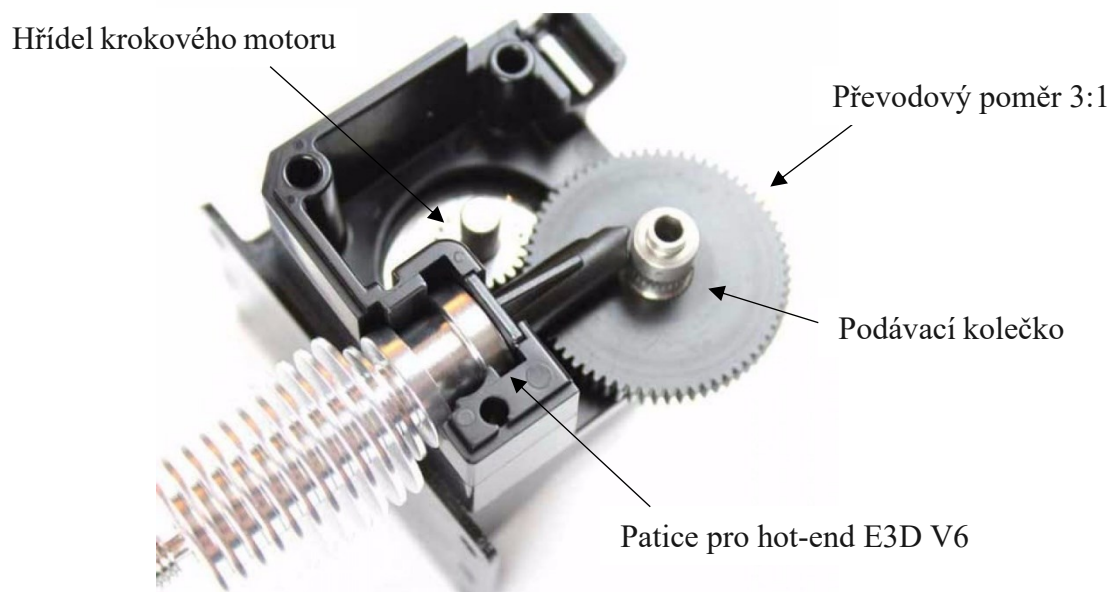


Obr. 56) Konstrukce hot-endu E3D V6

Zapnutím topného tělesa se přes hliníkový blok šíří teplo a ohřívá trysku, což způsobí tání vloženého filamentu ve spodní části modulu tiskové hlavy. Je zde spojení tohoto topného bloku s chladičem prostřednictvím komponenty zvané *heat break*, z překladu doslova přerušuje vedení tepla ze spodní části dále. Při tisku se běžně využívá tzv. retrakce, kdykoliv není potřeba vytlačovat filament z trysky, především u přejezdů, je natažen zpět směrem od trysky, aby nedocházelo k jeho nechtěnému úniku. Jelikož se termoplasty při zvyšování teploty roztahují, bez přítomnosti *heat breaku* a chlazení by docházelo k ucpání *hot-endu* nataženým filamentem při retrakcích. Pokročilé tiskové hlavy jsou vybaveny regulátorem otáček ventilátoru chladiče a přesné snímání teplot probíhá použitím kvalitních termočlánků.

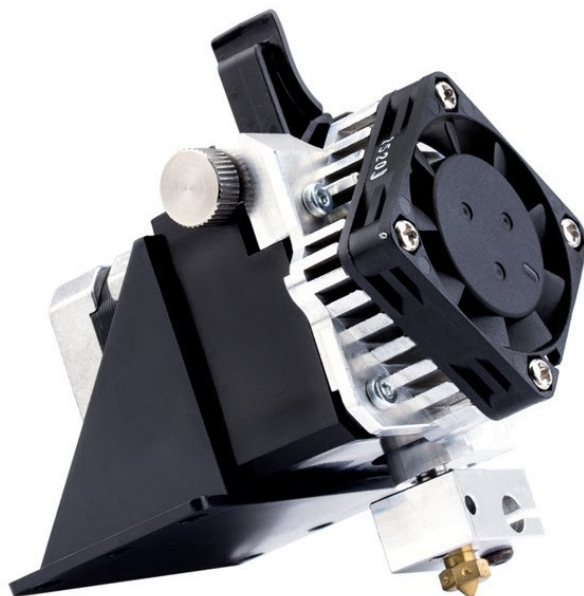
4.2.2 Extruder

Jinými slovy také podavač (Obr. 57), jedná se o mechanismus zavádějící filament do tiskové hlavy. Jedná se o vcelku jednoduchý princip, kdy je filament veden mezi podávacím kolečkem a kladkou, přitlačující jej k tomuto kolečku. Pohon mechanismu je zprostředkován krokovým motor, často se zde nachází převod pro maximalizaci výtlačné síly. Extruder může být buďto umístěn kdekoli na rámu tiskárny a s tiskovou hlavou je spojen teflonovou trubičkou, odtud název *bowden extruder*. Jiným řešením je, že podavač je součástí tiskové hlavy a je tak minimalizována vzdálenost mezi podávacími kolečky a topným blokem tavící filament. Tento typ se nazývá *direct drive extruder*. Minimalizace podávací vzdálenosti způsobuje velice přesný posun a filamentu, avšak narůstá hmotnost tiskové hlavy, především kvůli pohánějícímu motoru. Na Obr. 41 je spolehlivý podavač od firmy E3D zapojen napřímo s *hot-endem* V6.



Obr. 57) Extruder E3D Titan

Pro tento projekt byl zvolen Titan Aero, produkt od firmy E3D (Obr. 58). Jedná se o skvělou kombinaci hot-endu V6 a extruderu Titan při absolutní minimalizaci rozměrů. Speciální tisková hlava vážící i s krokovým motorem pouhých 240 g je uchycena na navrženém portálu a je jí umožněn pohyb ve dvou osách souřadného systému.



Obr. 58) Titan Aero od firmy E3D

4.2.3 Tisková podložka

Je důležitým komponentem, od kterého se odráží celková kvalita tištěného dílu. Ta je závislá především na první vrstvě, respektive jejím dobrém přilnutí k podložce, aby nedošlo v průběhu tisku k posunutí celého modelu. Pro návrh podložky (Obr. 59, 60) byly nejprve stanoveny důležité vlastnosti, které by měla splňovat.

- Povrch po celé ploše rovný
- Přílnavý vnějšek vhodný pro tavený plast
- Materiál s dobrou tepelnou vodivostí, aby bylo dosaženo rovnoměrného vyhřívání
- Dostatečně výkonné vyhřívání
- Uchycení podložky, aby bylo možné nastavovat její rovinu

Pro splnění podmínek dostatečné tepelné vodivosti a rovinnosti vnější plochy byla zvolena frézovaná hliníková deska EN 5083 o rozměrech 310 × 210 mm a tloušťka desky 6 mm, jakožto dostatečná hodnota, aby nebyla deska při zahřátí flexibilní. Teplotní roztažnost hliníku je dle [24] $\lambda = 23,8 \text{ } \mu\text{m/mK}$. Zahřátím z pokojové teploty 20° C na provozní teplotu 100° C dochází k expanzi dle rovnice

$$L_{t100^{\circ}\text{C}} = L_{t20^{\circ}\text{C}} + [L_{t20^{\circ}\text{C}} \cdot \lambda \cdot (t_1 - t_0)] \quad (25)$$

Pro rozměr $L_1 = 310$ mm je po ohřátí nová délka

$$L_{1; t_{100^\circ C}} = 310 + [310 \cdot 23,8 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 20)] = 310,59 \text{ mm} \quad (26)$$

a pro $L_2 = 210$ mm je nová délka

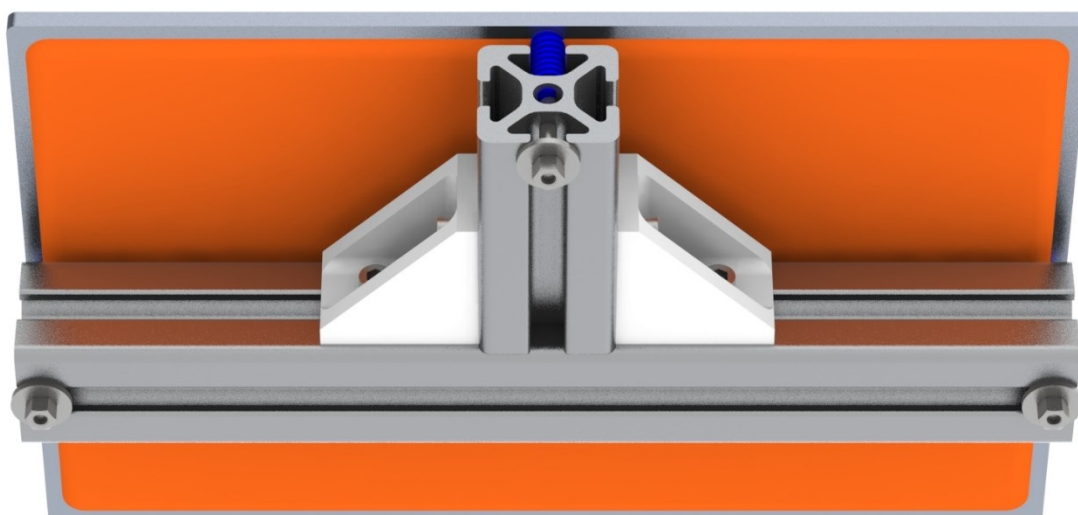
$$L_{2; t_{100^\circ C}} = 210 + [210 \cdot 23,8 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 20)] = 210,40 \text{ mm} \quad (27)$$

Pohyb podložky bude vykonáván ve svislé ose, uchycení samotné podložky je pak navrženo na konstrukci pomocí tří šroubů a tlačných pružin, které umožňují nastavit dvěma body nejprve osu podložky a třetím bodem pak naklopení kolem této osy, čímž je definována rovina. Pružiny pak umožní podložce teplotní roztahování bez vytvoření deformujících sil.

Na hliníkovou desku je z horní strany nalepena polyeterimidová (PEI) fólie, tedy termoplast s vysokou teplotní odolností a přílnavým povrchem pro běžně používané materiály u 3D tisku FDM metodou, jako jsou PLA, ASA či nylon.

O ohřev se stará silikonový vyhřívač od firmy *Keenovo*. Je vyráběn ve formě flexibilní nalepovací podložky, je zvolena s rozměry 300×200 mm, další parametry jsou

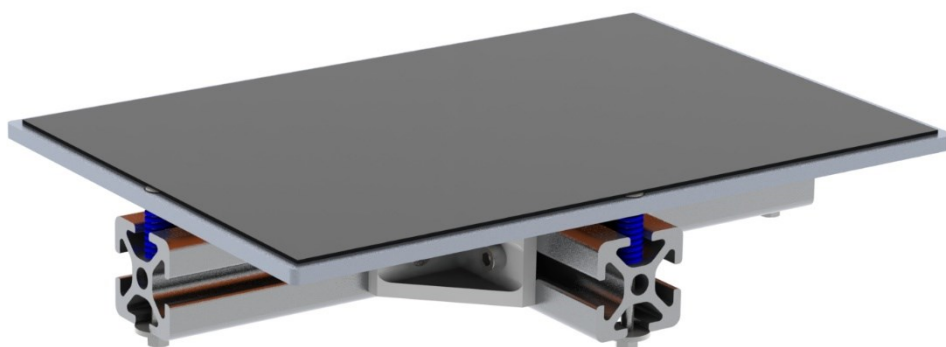
- Tloušťka: 1,5 mm
- Teplotní čidlo: Termistor NTC 3950 100K
- Napětí: 220 V
- Proud: 1,4 A
- Odpor: 161Ω
- Výkon: 300 W
- Maximální provozní teplota: 150°C



Obr. 59) Render pohledu zdola na navrženou tiskovou podložku

Výrobce je doporučena izolace podložky, například ve formě korkové desky. Podložka je zapojena přes SSR relé typu DC-AC, tedy polovodičový spínací prvek bez pohyblivých částí, zajišťující neustálým spínáním v krátkých intervalech požadovanou teplotu ohřevu. Zvolené SSR relé má následující parametry

- Vstup: 3 V ~ 32 V stejnosměrný proud
- Výstup: 24 V ~ 480 V střídavý proud
- Maximální proudové zatížení: 40 A



Obr. 60) Render pohledu shora na navrženou tiskovou podložku

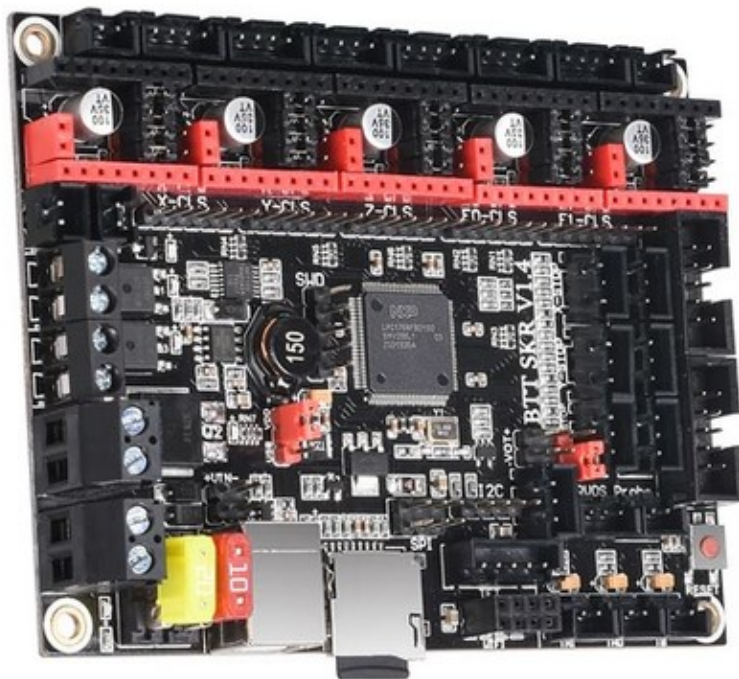
K vyhřívací silikonové podložce je připevněna tepelná pojistka přerušující obvod při teplotě 150° C. Je tak zajištěno, že při poruše a možnému odlepení silikonového ohřívače dojde k okamžitému přerušení dodávaného proudu. Na vývodu do sítě je umístěn vypínač s další pojistkou.

4.2.4 Řídící systém

Celý chod tiskárny obstarává řídící deska SKR V1.4 Turbo (Obr. 61). Jedná se o produkt čínské společnosti *BigTree Technology*, deska má pak následující parametry.

- 32bitový mikroprocesor s jádrem ARM Cortex-M3 o frekvenci 120 MHz
- Podpora vstupního napětí DC12 – 24 V
- Podpora až 5 krokových motorů a jejich nejnovějších budičů, včetně použitého TMC2209
- Možnost použití všech dostupných typů LCD displejů včetně podpory pro dotykovou funkci
- Konfigurace firmware možná přes MicroSD kartu
- Pokračování v tisku při opětovném spuštění po výpadku proudu, automatické vypnutí tiskárny po dokončení tisku
- Konektory pro RGB LED pásek, až 4 ventilátory, kvalitní MOSFET tranzistory
- Připravený obvod pro pohodlné zapnutí funkcí zkratovacími propojkami (jumpery)

Využitím 32bitového mikroprocesoru jsou zrychleny veškeré výpočty trasy křivek a oblouků, které musí být provedeny. Dochází tak i ke zlepšení celkové kvality tištěného dílu. Desku ovládá řídící open-source firmware *Marlin*, sestavený speciálně pro 3D tiskárny (Obr. 62). Byl vydán již v roce 2011 na webové službě pro vývoj open-source software, GitHubu, jakožto spolehlivý ovladač tiskáren. Později jej začaly využívat i světoznámé firmy a byl rozšířen na podporu CNC obrábění a laserového gravírování. Byl primárně vytvořen pro levné řídící desky fungující na 8bitových mikroprocesorech, díky čemu získal na popularitě. Nejnovější verze již podporuje i 32bitové procesory. [44][45]

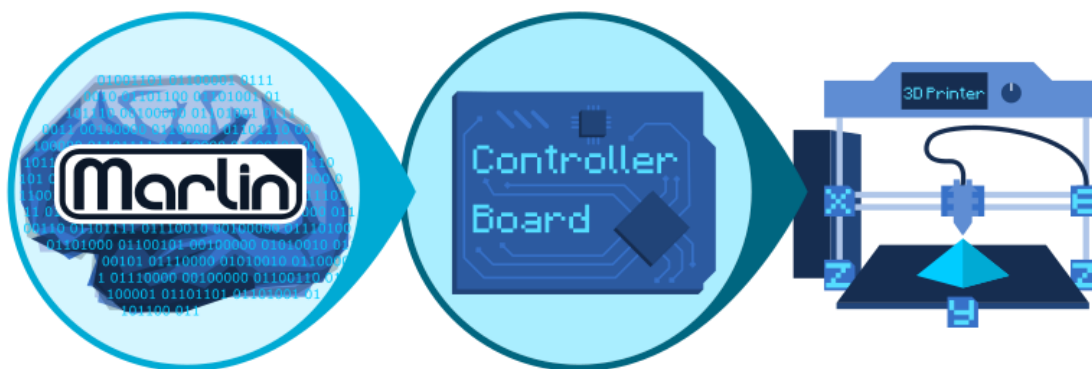


Obr. 61) Řídící deska SKR V1.4 Turbo

Disponuje vylepšenou PID regulací teploty ohřevu, podporou více než 150 příkazů G-kódu, snadný přístup k nastavení důležitých parametrů přímo v prostředí LCD displeje tiskárny. Díky obrovské vývojářské komunitě je firmware dnes dostupný ve více než 20 jazycích, včetně češtiny.

Jedná se o řídicí systém pro FDM 3D tiskárny zpracovávající veškeré real-time aktivity potřebné pro chod stroje. Spravuje tak ohřevy, krokové motory, veškeré senzory, displeje, tlačítka, osvětlení a mnoho dalšího. Samotný tisk je zprostředkován nahráním tzv. G-kódu, což je programovací jazyk obráběcích strojů definující pohybové a další pomocné instrukce. Nahrání tohoto kódu do tiskárny je možné přes SD kartu, USB rozhraní či bezdrátové Wi-Fi připojení. Firmware, v tomto případě *Marlin*, tento kód následně zpracovává.

Ovládání je k dispozici v přední části tiskárny, kde je osazen dotykový barevný LCD displej s úhlopříčkou 3,5 palců (Obr. 63). Napájení kompletní elektronické části zajišťuje zdroj XP Power LCL300PS12 s výstupním napětím 12 V a výkonem 300 W.



Obr. 63) Schéma řídicího systému



Obr. 62) Dotykový LCD displej MKS TFT35

5 ZÁVĚR

Diplomová práce popisuje kompletní konstrukční návrh 3D tiskárny. Postupně byly vypsány důležité používané metody, přičemž byla zvolena metoda materiálové extruze neboli typ tiskárny FDM. I tak se nabízí několik možností, jak tuto tiskárnu sestavit, byl zvolen jeden z méně používaných pohybových mechanismů.

Hlavní nosný rám je sestaven ze stavebnicových hliníkových profilů typu 4040 spojených šrouby M8. Díky tomu je konstrukce tiskárny robustní a stabilní, avšak za cenu vyšší hmotnosti.

V horní části tohoto rámu je na pevně uložen navržený portál, tedy konstrukce zajišťující pohyb tiskové hlavy ve dvou osách. Je složen z lineárních vodících tyčí a k nim příslušných lineárních ložisek. Veškeré komponenty jsou pak osazeny v navržených dílech, které jsou vytištěny z materiálu PLA plus. Tento materiál byl zvolen záměrně, jelikož byly veškeré díly tištěny na méně kvalitní tiskárně, která není uzpůsobena tisku z náročnějších materiálů z důvodu slabě výkonné tiskové podložky. Materiál PLA plus obsahuje příměsi zlepšující vlastnosti klasického PLA a při testování obstál jako vhodný materiál i pro tuto navrženou konstrukci. Nicméně bylo navrženo postupně několik verzí, zejména pak komponent, do kterých se lisují ložiska. Pro rychlé rozebrání konstrukce byl nejprve vytvořen úchyt v jedné z hlavních os složen ze dvou částí, mezi které byly vloženy ložiska a následně byly tyto části spojeny šroubovými spoji. I za použití závitových vložek do plastu nebyly tyto spojení dokonalá a při pohybu docházelo k deformaci uchycení ložisek. Proto byly tyto důležité díly navrženy a vytištěny v celku a ložiska do nich byly nalisovány. Lineární ložiska i vodící tyče jsou i přes nalisování ještě zajištěny šrouby, zde bylo zapotřebí u díry pro šroub navrhnout i místo pro podložku, jelikož bez ní docházelo k praskání plastu při utažení.

Tisková hlava je uložena na těchto vodících tyčích a její pohyb je realizován dvěma krokovými motory s uchycovací přírubou NEMA 17 a točivým momentem 59 Ncm. S motory je spojena řemeny typu 2GT, které jsou napnuty systémem kladek a samotný pohyb ovládají budiče krokových motorů typu TMC2209. Tyto ovladače disponují mnoha funkcemi, jako kontinuální měření zátěže a následnou optimalizací vstupního proudu, či interpolací mikrokrokování v závislosti na zátěži a potřebné rychlosti. Zvolené motory byly ověřeny sérií výpočtů a jsou plně vyhovující.

Pro samotný tisk je zapotřebí extruderu, tedy podavače, který zajišťuje přísun materiálu, struny z termoplastu, do tiskové hlavy, kde je taven. Pro maximálně bezproblémový tisk byla zvolena tisková hlava Titan Aero obsahující současně i extruder a je tak dokonale minimalizována vzdálenost mezi vstupem materiálu a místem jeho tavení, což umožňuje tisk i s například flexibilními materiály.

Pohybový mechanismus je založen na pohybu tiskové hlavy ve dvou osách portálu a třetí osu zajišťuje zdvihací mechanismus. Je složen ze dvou vodících tyčí a lineárních ložisek a pro

pohyb je použit stejný krokový motor, jako pro pohyb ve zbylých osách. Tento motor přenáší točivý moment přes pružnou spojku na trapézový šroub typu Tr 10 × 3 a celý mechanismus je podroben výpočtům na nosnost. Nejvíce namáhanou součástí je pak zdvihací vozík, který nese kompletní konstrukci tiskové podložky a případného vytištěného dílu. Byla nejprve provedena analýza MKP v simulačním prostředí modelovacího software Solidworks. Jelikož jsou tištěné díly závislé na spoustu vlivech, následně byla teoretická vypočtená bezpečnost ověřena i experimentálním měřením na zkušebním trhačím stroji, kde vyšla reálná bezpečnost zhruba poloviční, avšak stále plně dostačující.

Tisková podložka je sestavena z frézované hliníkové desky o rozměrech 300 × 200 mm, na kterou je nalepen silikonový ohříváč o výkonu 300 W, zajišťující dle výrobce dostatečný výkon pro ohřev podložky až na 150 °C. Ohřev bude ještě v budoucnu testován při provozu tiskárny a v případě potřeby bude zaizolován například korkovou deskou. Tato podložka je uložena na konstrukci z hliníkových profilů přes 3 šrouby a tlačné pružiny, umožňující nastavit nejprve osu podložky a poté třetím šroubem i naklopení kolem této osy. Jedná se o mnohem elegantnější řešení, než nabízí většina dostupných tiskáren, které mají tuto podložku uchycenou čtyřmi šrouby a je relativně obtížné nalézt správnou rovinu.

Řídící firmware Marlin, vytvořen tiskařskou komunitou jako open-source, je nahrán do řídicí desky s označením SKR V1.4 Turbo, obsahující 32bitový mikroprocesor o frekvenci 120 MHz, který oproti zastaralým deskám s 8bitovým mikroprocesorem zvládá mnohonásobně více operací a veškeré výpočty tras pohybu jsou urychleny. Tento firmware pak podporuje přes 150 druhů příkazů G-kódu a řídí tak celou tiskárnu od krokových motorů, přes ohřev, senzory, displeje, tlačítka či osvětlení.

Pro snížení teplotních ztrát během tisku a odstranění okolních vlivů, například průvanu, je celá konstrukce osazena akrylátovými deskami tvořící kompletní zakrytování. Přístup k tiskové podložce je realizován dvířky z plexiskla připevněných na dvou pantech k rámu. Elektronika je osazena ve spodní části tiskárny a tento prostor je chlazen dvěma ventilátory, aby nedocházelo k přehřívání řídicí desky a zdroje. V přední části tiskárny je dostupný dotykový LCD displej, kterým je možné tiskárnu ovládat. Pro pohodlný tisk nabízí také USB port, slot pro SD kartu a bezdrátové rozhraní Wi-Fi.

Tiskárna byla dle navrženého modelu i sestavena. Vycházel jsem především ze zkušeností s FDM tiskárnami, kdy jsem v minulosti předělal kompletní konstrukci nejmenované čínské tiskárny. Konstrukce navržená v této práci byla podrobena mnoha testům, je plně vyhovující, avšak stále jsou místa k vylepšování. Jedním takovým je například materiál tištěných plastových dílů, jelikož jsem byl limitován nedostatečným ohřevem na staré tiskárně, kde byly tyto díly tištěny. Jsou z materiálu Gembird PLA plus, který díky příměsím má mnohem lepší vlastnosti než klasické PLA, avšak stále lepší volbou by v tomto případě byl materiál PETG či ABS. Při stavbě byla zohledněna i celková cena, byly použity například vodící tyče s lineárními ložisky namísto drahých lineárních kolejnic.

LITERATURA

- [1] REDWOOD, B., F. SCHÖFFER a B. GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-9082748505.
- [2] What is 3D printing? The definitive guide. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [3] The Advantages of 3D Printing. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>
- [4] Dimensional accuracy of 3D printed parts. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/>
- [5] Introduction to FDM 3D printing. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [6] 5 Ways You Can Use 3D Printing to Create a Prototype. *Machine Design* [online]. Nashville: Endeavor Business Media, 2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/5-ways-you-can-use-3d-printing-create-prototype>
- [7] 3D Prints Warping or Curling? – Why It Happens and How to Prevent It. *Rigid.ink* [online]. Wetherby: rigid.ink, 2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://rigid.ink/blogs/news/3d-prints-warping-why-it-happens-and-how-to-prevent-it>
- [8] Rafts, Skirts and Brims! *Simplify3D* [online]. Cincinnati: Simplify3D, c2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/articles/rafts-skirts-and-brims/>
- [9] Types of 3D Printing Technology. *All3DP* [online]. München: All3DP, 2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology>
- [10] Validating Isotropy in SLA 3D Printing. *Formlabs* [online]. Somerville: Formlabs, 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/isotropy-in-SLA-3D-printing/>

- [11] Introduction to SLA 3D printing. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V, c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [12] HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V., c2019 [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- [13] HP JET FUSION. *3Dees* [online]. Praha: 3Dees Industries, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>
- [14] 3D tisk z polyamidu bez použití laseru. *Materialise* [online]. Leuven: Materialise NV, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravu/multi-jet-fusion>
- [15] All About SLS Printing: Advantages, Disadvantages, History, and more. *3D Insider* [online]. San Francisco, CA: 3D Insider, 2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/sls-printing/>
- [16] What Is Material Jetting? – 3D Printing Simply Explained. *All3DP* [online]. München: All3DP, 2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- [17] Introduction to material jetting 3D printing. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V, c2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/#what>
- [18] Seznam materiálů pro 3D tisk. *Materialpro3d.cz* [online]. Brno: Solidify 3D [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [19] The 3D Printing Materials Guide. *All3DP* [online]. München: All3DP, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>
- [20] What is the best type of plastic for my 3D printing application? *3D Matter* [online]. San Diego: SD3D Printing, 2016 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>

- [21] SLA 3D printing materials compared. *3D Hubs* [online]. Amsterdam: 3D Hubs B.V, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/>
- [22] Materiály pro SLA tisk a jejich vlastnosti. *PB-com* [online]. Uherský Brod: PB-com CNC OBRÁBĚNÍ, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.pb-com.cz/soubor.php?id=23>
- [23] Pohony s krokovými motorky. Katedra elektroenergetiky VŠB-TUO [online]. Ostrava – Poruba: VŠB-TU Ostrava, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_C_el_pohony/se_eph_c1_krokac_02_teorie.pdf
- [24] Navrhování lineárního vedení. *MonorailWiki* [online]. Tábor: INOMECH, c2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: http://www.monorail.cz/wiki/index.php?title=Navrhování:Lineární_vedení:Výpočet_a_dimenzování
- [25] SHIGLEY, J. E., C. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS, VLK, M., ed. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [26] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [27] Jak na upravitelné podpory v Meshmixeru. *Prusa 3D* [online]. Praha: Prusa Research, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-na-upravitelne-podpory-v-meshmixeru/>
- [28] Designer uses 3D printing to optimize the sound absorption qualities of geometric structures. *3ders.org* [online]. 3ders.org, c2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20150604-designer-uses-3d-printing-to-optimize-the-sound-absorption-qualities-of-geometric-structures.html>
- [29] 7 things to consider when buying a 3D printer. *Gadgetronicx* [online]. 2019 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.gadgetronicx.com/things-consider-buying-3d-printer/>
- [30] The Best Cura Infill Pattern. *All3DP* [online]. München: All3DP, 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- [31] LulzBot Mini Review: Compact, Powerful Yet Easy to Use. *3Dprintingforbeginners.com* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/lulzbot-mini-review/>

- [32] Příručka pro odstranění problémů kvality 3D tisku. *Prusa 3D* [online]. Praha: Prusa Research, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/print-quality-troubleshooting/>
- [33] Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S. *Prusa 3D* [online]. Praha: Prusa Research, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [34] Creality Ender 3 Pro 3D Printer. *Creality* [online]. Shenzhen: Creality, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/creality-ender-3-pro-3d-printer>
- [35] Ultimaker S3. *Ultimaker* [online]. Utrecht: Ultimaker BV, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s3>
- [36] Anycubic Photon. *Anycubic* [online]. Shenzhen: ANYCUBIC 3D Printing, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-photon-3d-printer>
- [37] Formlabs Form 3. *Formlabs* [online]. Somerville, MA: Formlabs, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/>
- [38] J750 Digital Anatomy 3D Printer. *Stratasys* [online]. Eden Prairie, MN: Stratasys, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/j750-digital-anatomy>
- [39] OBJET30 PRO. *Stratasys* [online]. Eden Prairie, MN: Stratasys, c2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/objet30-pro>
- [40] Formlabs Fuse 1. *Formlabs* [online]. Somerville, MA: Formlabs, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/fuse-1/>
- [41] SCHMITT, Betina Madeira aj. *A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. Mat. Res.* [online]. 2017, [cit. 2020-05-14], pp.883-886. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000800883
- [42] CoreXY: Cartesian Motion Platform. *CoreXY* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://corexy.com/theory.html>
- [43] TMC2209-LA. *Trinamic* [online]. Hamburg: Trinamic, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/>

- [44] E3D Online. *Marlin Firmware* [online]. Chalgrove, Oxfordshire: E3D-Online Limited, c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/hotends>
- [45] BTT SKR V1.4 & SKR V1.4 Turbo 32-Bit Control Board. *Bigtree Technology* [online]. Shenzhen: Bigtree Technology Co., c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.biqu.equipment/products/btt-skr-v1-4-skr-v1-4-pro>
- [46] MKS TFT35. *Makerbase* [online]. Guangzhou: Makerbase Co., c2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://makerbase.com.cn/en/products/>
- [47] Marlin Firmware. *Marlin Firmware* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://marlinfw.org>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1) Princip technologie FDM [2]	13
Obr. 2) Různé typy podpor a jejich vliv na dobu tisku [27]	14
Obr. 3) Geometrická struktura pro optimalizaci pohlcování zvuku [28]	14
Obr. 4) Vývoj produktu využitím tištěných prototypů [2]	15
Obr. 5) Schéma tiskárny využívající metodu FDM [2]	17
Obr. 6) Různé průměry trysek [29]	18
Obr. 7) Zobrazení formování vrstev FDM metodou [10]	18
Obr. 8) Možné tvary výplní vnitřního objemu [30]	19
Obr. 9) Různá hustota výplně [17]	19
Obr. 10) Kroucení dílů v důsledku špatného tuhnutí vrstev [7]	20
Obr. 11) a) Raft – podstava pod dílem; b) Brim – prodloužená první vrstva [8]	20
Obr. 12) Vliv délky mostu na průhyb vrstev [31]	21
Obr. 13) – a) Značný vliv směru zatížení na pevnost dílu; b) Identické válce vytištěné v různých orientacích [1]	21
Obr. 14) Porovnání průměru otvoru ve 3D modelu oproti skutečné součásti [1]	22
Obr. 15) Zleva – tryska je moc blízko podložky, ideální vzdálenost, tryska je moc vysoko (ztráta přilnavosti) [32]	22
Obr. 16) Tiskárna Prusa i3 MK3S [33]	23
Obr. 17) Tiskárna Creality Ender 3 PRO [34]	23
Obr. 18) Tiskárna Ultimaker S3 [35]	24
Obr. 19) Schéma tiskárny využívající metodu SLA [2]	25
Obr. 20) Proces tisku metodou stereolitografie [1]	26
Obr. 21) Model vytištěný na SLA tiskárně je uceleným polymerem [10]	26
Obr. 22) Schéma SLA tiskárny využívající klesající platformu [1]	27
Obr. 23) Schéma SLA tiskárny využívající stoupající platformu [1]	27
Obr. 24) SLA Tiskárna Anycubic Photon [36]	28
Obr. 25) SLA Tiskárna Formlabs Form 3 [37]	29
Obr. 26) Schéma tiskárny využívající metodu SLS [2]	30
Obr. 27) Proces tisku metodou laserového sintrování [1]	31
Obr. 28) Detailní pohled na spékání prášku CO2 laserem metodou SLS [9]	31
Obr. 29) SLS Tiskárna Formlabs Fuse 1 [40]	32
Obr. 30) Schéma tiskárny využívající metodu MJ [17]	33
Obr. 31) Ukázka vytištěného modelu technologií Material Jetting [16]	34
Obr. 32) Tiskárna Stratasys PolyJet J750 [38]	35
Obr. 33) Tiskárna Stratasys Objet30 Pro [39]	35
Obr. 34) Hodnocení PLA [20]	37
Obr. 35) Hodnocení ABS [20]	38

Obr. 36) Hodnocení Nylon [20]	39
Obr. 37) Hodnocení PETG [20]	40
Obr. 38) Hodnocení TPU [20].....	41
Obr. 39) Kartézský systém u FDM tiskáren [41]	43
Obr. 40) Systém Delta u FDM tiskáren [41]	44
Obr. 41) Schéma CoreXY mechanismu [42].....	45
Obr. 42) Konstrukce portálu při pohledu zepředu	46
Obr. 43) Konstrukce portálu při pohledu zezadu	46
Obr. 44) Blokový diagram budiče TMC2209 [43].....	47
Obr. 45) Úbytek točivého momentu krokového motoru využitím mikrokrokování	48
Obr. 46) Parametry lineárních ložisek	50
Obr. 47) Výpočet ložiskových sil u vozíku	50
Obr. 48) Zdvhací systém tiskárny	51
Obr. 49) Renderovaný model zdvihacího vozíku	52
Obr. 50) MKP analýza zdvihacího vozíku	53
Obr. 51) Deformační křivka získaná experimentálním měřením zatížení.....	54
Obr. 52) Render řezu uchycení horního konce šroubu	55
Obr. 53) Render řezu uchycení šroubu s motorem	55
Obr. 54) Render navržené konstrukce rámu	57
Obr. 55) Render navržené tiskárny s okrytováním	58
Obr. 56) Konstrukce hot-endu E3D V6 [44]	59
Obr. 57) Extruder E3D Titan [44]	60
Obr. 58) Titan Aero od firmy E3D [44]	61
Obr. 59) Render pohledu zdola na navrženou tiskovou podložku	62
Obr. 60) Render pohledu shora na navrženou tiskovou podložku	63
Obr. 61) Řídící deska SKR V1.4 Turbo [45].....	64
Obr. 63) Dotykový LCD displej MKS TFT35 [46].....	65
Obr. 62) Schéma řídicího systému [47].....	65